5/7

Audio-Hifi: compact disk spelers

Inhoud

5/7.1
Het CD-systeem

Inleiding

Het ingewikkeldste consumersysteem

Het door Philips en Sony ontwikkelde compact disk systeem werd in 1983 geïntroduceerd als opvolger en vervanger van de geluidsregistratie op analoge langspeelplaten. Men kan zonder meer stellen dat dit systeem het meest ingewikkelde elektronische systeem is dat ooit voor de consumermarkt werd ontworpen. Dat het CD-systeem een toekomstgeoriënteerde ontwikkeling is blijkt wel uit het feit dat hetzelfde systeem nu op computergebied aan het doorbreken is als vervanging van de magnetische dataregistratie op harde en zachte schijven.

Langspeelplaat en computerdisk versus compact disk

De omschakeling van analoge langspeelplaat naar digitale compact disk was een radikale omschakeling. Behalve het gegeven dat beide systemen tot doel hebben audio-informatie te bewaren en te reproduceren en dat beide systemen daarvoor gebruik maken van een draaiende schijf voorzien van een spiraalvormig informatiespoor kan men geen enkel vergelijkingspunt opnoemen.

Maar er is meer waardoor de technieken die in het CD-systeem gebruikt worden zich onderscheiden van alles wat er voordien ontwikkeld was. De registratie van gegevens onder zuiver digitale vorm was uiteraard niet nieuw.
Alle zachte en harde computerschijven maken er gebruik van.
Het feit dat het ene systeem gebruikt maakt van lichtverschijnselen als aftastmiddel en het andere van magnetische principes mag dan technisch grote consequenties hebben, principieel maakt dat niet erg veel uit.

Het punt waardoor het CD-systeem zich fundamenteel onderscheid van de digitale signaalregistratie op computerschijven is de manier waarop de digitale gegevens worden gecodeerd alvorens zij op de compact disk worden gezet.
Bij magnetische digitale registratie worden de binnenkomende digitale gegevens omgezet in een seriële code en als dusdanig op de schijf gezet. Bij het CD-systeem echter ondergaat de seriële digitale code die het geluidssignaal voorstelt niet minder dan zeven signaalbewerkingen of code-omzettingen alvorens op de compact disk gezet te worden. De uiteindelijke code van enen en nullen op de CD kan alleen middels zeer ingewikkelde wiskundige en logische bewerkingen weer omgezet worden in een "gewone" seriële code die via DAC's omgezet kan worden in analoge audio-informatie. Dat dit alleen

mogelijk is dank zij het gebruik van een microprocessor in de CD-speler zal duidelijk zijn!

Deze signaalbewerkingen geven de CD niet alleen een zeer lange speelduur maar zorgen er ook voor dat in de praktijk regelmatig voorkomende leesfouten bij het afspelen van de CD automatisch gecorrigeerd worden.
Bovendien bestaat dank zij deze code de mogelijkheid bijkomende gegevens op de CD te registreren.

Systeembespreking
Het volledige CD-systeem wordt besproken in vier hoofdstukken:
- in dit hoofdstuk 5/7.1 wordt in het kort een overzicht gegeven van hoe het gehele systeem werkt;
- in hoofdstuk 5/7.2, "De Compact Disk" genoemd, wordt de fabricage en de samenstelling van het medium, de CD zélf, besproken;
- hoofdstuk 5/7.3, "De codering van het audiosignaal", behandelt zeer diepgaand de lange weg die het signaal doorloopt tussen de analoge microfoons in de studio en het patroon van enen en nullen dat uiteindelijk in het oppervlak van de CD wordt geperst;
- in hoofdstuk 5/7.4, "De optische pick-up" genoemd, worden de verschillende systemen behandeld die zijn ontwikkeld om het patroon van enen en nullen op de CD via het belichten van de CD met een laserstraal weer om te zetten in elektronische informatie;
- in hoofdstuk 5/7.5, "Signaalverwerking in de CD-speler", worden de elektronische schakelingen besproken die de door de optische pick-up geregenereerde elektronische code omzetten in een analoog audiosignaal.

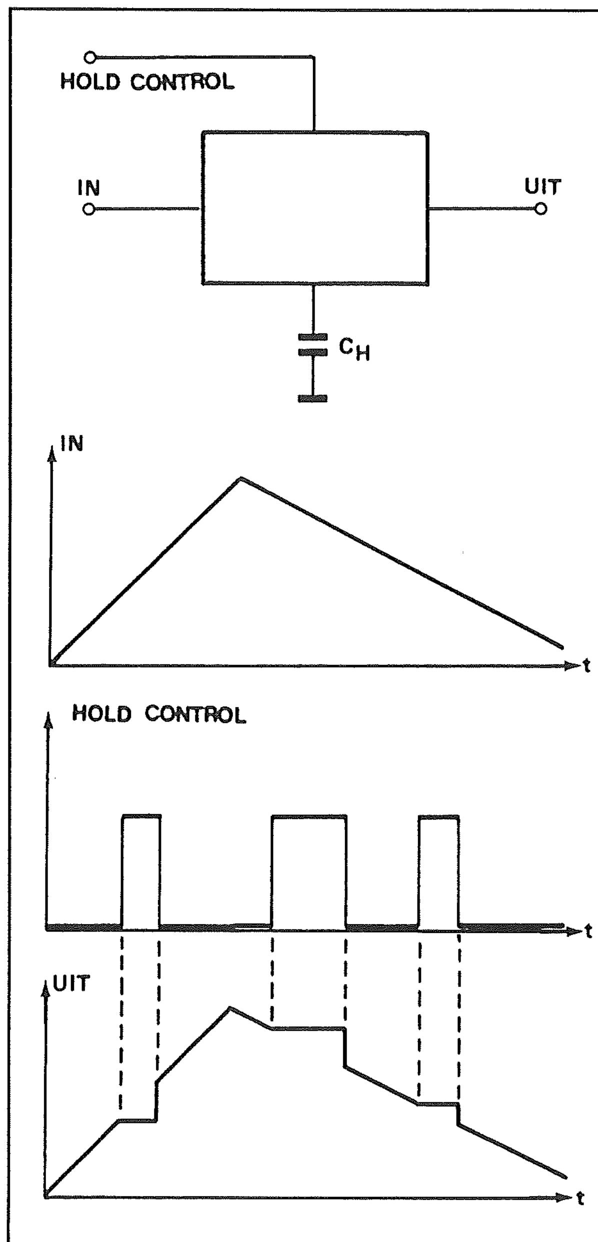
Van analoog naar digitaal

ADC met 16 bit resolutie en 44.100 monsters per seconde
Het principe van analoog naar digitaal omzetting is bekend. Het proces wordt steeds in twee fasen uitgevoerd. In de eerste fase, de zogenaamde "sample and hold" wordt het analoge signaal als het ware even bevroren op de momentele waarde. In figuur 5/7.1-1 is dit schematisch voorgesteld. Een zaagtandvormig verlopende analoge ingangsspanning wordt op commando van de HOLD CONTROL even opgeslagen in een kleine condensator. Op de uitgang van de S&H zal de momentele waarde die de ingangsspanning had op het moment dat de HOLD CONTROL puls verscheen bewaard blijven.

Dat noemt men "het bemonsteren van het analoge signaal" en het aantal monsters dat per seconde wordt genomen (de samplefrequentie) is de eerste belangrijke parameter van het analoog naar digitaal procédé. Hoe meer monsters worden genomen, hoe nauwkeuriger de opeenvolging van digitale codes het originele analoge signaal zal representeren.

Nadien worden de monsters door een analoog naar digitaal omzetter, een ADC, omgezet in een digitale code. Dit proces is toegelicht in figuur 5/7.1-2, waar een sinusvormige periode van een analoog signaal twintig keer wordt bemonsterd en ieder monster door de ADC wordt omgezet in een unieke digitale code.
Het aantal bits waaruit deze codes bestaat, de zogenaamde resolutie, vormt de tweede belangrijke parameter van het gehele proces.

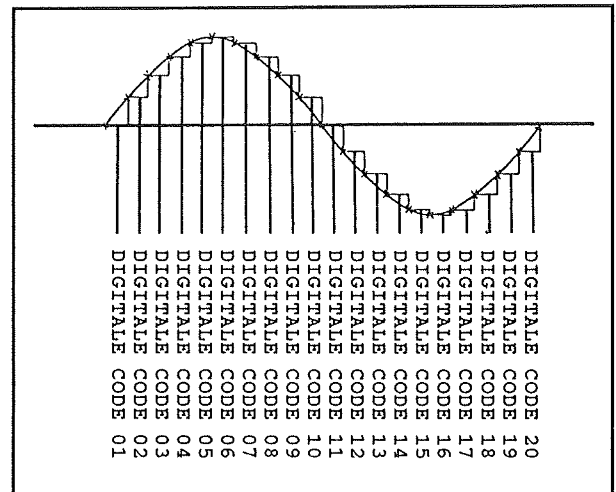
7.1 Het CD-systeem



Figuur 5/7.1-1: Het bemonsteren van een analoog signaal door een sample and hold schakeling.

Hoe meer bits, hoe nauwkeuriger de individuele digitale codes de waarde van de bemonsterde spanning zullen benaderen.

Bij het CD-systeem wordt met twee analoge signalen gewerkt.



Figuur 5/7.1-2: De door de S&H genomen monsters van het analoge signaal worden door een ADC omgezet in digitale codes.

Het stereofonisch signaal dat uit een linker en rechter kanaal bestaat, wordt 44.100 keer per seconde bemonsterd met een resolutie van 16 bit.
Deze digitale codes vormen de fundamentele geluidscodering.
In totaal levert dit systeem dus
2 x 44.100 x 16 = 1.411.200 bits
per seconde en deze immens grote hoeveelheid digitale informatie moet per seconde op de compact disk worden geschreven!
Als men weet dat de CD een gemiddelde omwentelingssnelheid heeft van 300 toeren per minuut en dat iedere omwenteling gemiddeld genomen een omtrek heeft van 314 mm kan men berekenen dat deze informatie op 1.570 mm ondergebracht moet worden. Voor ieder bitje staat dus 0,0011 mm of iets meer dan 1 μm ter beschikking!

Deze noodzakelijke enorme informatiedichtheid van de compact disk is een van de redenen waarom men de fundamentele digitale code flink bewerkt en omvormt.

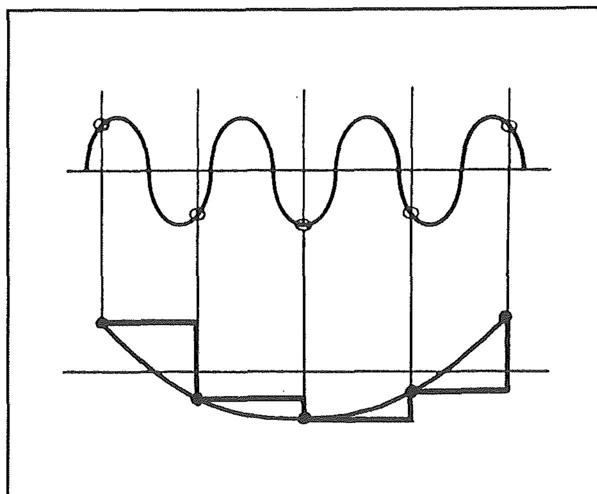
7.1 Het CD-systeem

Het belang van de hoge samplefrequentie

In de CD-speler wordt de fundamentele digitale geluidscode weer terug gewonnen uit de informatie op de CD. Nadien worden de digitale samples aangeboden aan een digitaal naar analoog omvormer, een DAC, die er een analoog signaal uit afleidt. Uiteraard verloopt deze analoge spanning trapvormig. In wezen is dit signaal gelijk van vorm aan het gesampelde signaal dat aan de ADC wordt geleverd. Dit signaal wordt afgerond door het door een zeer scherp afsnijdend laagdoorlaatfilter te voeren.

Men kan zich afvragen waarom het noodzakelijk is een samplefrequentie van 44,1 kHz te gebruiken. Dit wordt toegelicht aan de hand van de grafieken in figuur 5/7.1-3.
In de bovenste grafiek zijn enige perioden van een sinusvormig signaal getekend. Dit signaal wordt gesampeld met een frequentie die iets lager is dan de frequentie van het signaal. Als de digitale codes die ontstaan nadien weer middels een DAC worden omgezet in een analoog signaal ontstaat de trapvormig verlopend spanning die in de onderste grafiek getekend is. Voert men dit signaal door een scherp afsnijdend laagdoorlaatfilter om het signaal af te ronden, dan ontstaat een analoog signaal dat in niets lijkt op het originele signaal! De frequentie van het herwonnen analoge signaal is een factor drie lager dan de frequentie van het oorspronkelijke signaal.

Dit vreemde verschijnsel staat bekend onder de naam “aliasing error”. Om dit verschijnsel te voorkomen moet de samplefrequentie minstens twee maal hoger zijn dan de maximale frequentie.



Figuur 5/7.1-3: Het verschijnsel “aliasing error” toegelicht aan de hand van een sprekend voorbeeld.

Bij het ontwerpen van het CD-systeem is men uitgegaan van een signaalbandbreedte van 20 kHz.

Het logische gevolg is dus dat de samplefrequentie minstens gelijk moet zijn aan 40 kHz, zodat de gekozen 44,1 kHz niet eens zo veel hoger is dan de minimale waarde.

Het belang van de hoge resolutie

Zoals reeds gezegd bepaalt de resolutie de nauwkeurigheid waarmee de individuele digitale codes de spanningswaarde van de samples kunnen benaderen.
Bij een 16 bit systeem staan 65536 codes ter beschikking om de in theorie oneindig groot aantal waarden die de samples kunnen hebben tussen het positieve en negatieve signaalmaximum te “vangen”.
Als de analoge spanning een top-tot-top waarde van 10 V zou hebben, dan zou het minimale spanningsverschil tussen twee opeenvolgende samples dat nog te detecteren is gelijk zijn aan 152 µV.
Men kan zonder meer stellen dat de ontwerpers van het CD-systeem wat resolutie

betreft welhaast absurd hoge eisen aan zichzelf hebben gesteld. Bij digitale geluidsoverdracht tussen bijvoorbeeld de ene en de andere studio wordt meestal gewerkt met een resolutie van slechts 14 bit.

Er bestaat een rechtstreeks verband tussen de resolutie van de AD-omzetting en het dynamische bereik van het systeem. Het dynamische bereik drukt de verhouding, gegeven in dB, uit tussen het minimale en maximale signaal dat door het systeem weergegeven kan worden.
Zoals uit de tabel van figuur 5/7.1-4 blijkt geeft een 16 bit systeem een theoretisch dynamisch bereik van 96 dB

Theoretische signaal/ruis verhouding van het CD-systeem
Het dynamische bereik heeft rechtstreeks te maken met de theoretische signaal/ruis verhouding van een weergeefsysteem. In principe kan men stellen dat de maximaal haalbare signaal/ruis afstand gelijk is aan het dynamische bereik.

Met opzet wordt hierbij gesproken van "het maximaal haalbare" omdat de signaal/ruis verhouding uiteraard ook nog van een heleboel andere factoren afhankelijk is.
Zo zal de waarde van 96 dB alleen benaderd worden als de opnamestudio met digitale apparatuur werkt en de volledige signaalweg tussen microfoons en voorbereiding van het uiteindelijke CD-signaal digitaal wordt afgelegd.
Iedere bezitter van CD's weet uit ervaring dat vele optische platen net zo erg ruisen als langspeelplaten. Dat is een gevolg van het feit dat men voor vele CD's gebruik maakt van oude, nog analoog opgenomen signalen.

WOORD LENGTE	RESOLUTIE 1:2n	THEORETISCH MAXIMALE DYNAMISCH BEREIK	BITGROOTTE BIJ 10V VOLLESCHAAL SPANNING
1	2	6dB	5.0V
2	4	12dB	2.5V
3	8	18dB	1.25V
4	16	24dB	0,625V
5	32	30dB	0,312V
6	64	36dB	0,156V
7	128	42dB	78,1mV
8	256	48dB	39,1mV
9	512	54dB	19,5mV
10	1024	60dB	9,7mV
11	2048	66dB	4,8mV
12	4096	72dB	2,4mV
13	8192	78dB	1,2mV
14	16384	84dB	610uV
15	32768	90dB	305uV
16	65536	96dB	152uV

Figuur 5/7.1-4: Uit deze tabel kan de relatie worden afgelezen tussen woordlengte, resolutie, dynamisch bereik en bitgrootte van een AD-systeem.

De compact disk

Samenstelling
De compact disk bestaat uit een ongeveer 1,2 mm dikke plaat uit acrylplastic met een diameter van 12 cm.
Het signaal is aan de bovenzijde van deze plaat aanwezig onder de vorm van een groot aantal zogenaamde nokken en dammen.
De nokken zijn microscopisch kleine putjes die in het oppervlak van de plaat worden geperst. De dammen vormen het onaangetaste plaatoppervlak tussen de nokken of putjes. De overgangen tussen nokken en dammen noemt men de tikken.
Iedere nok heeft dus twee tikken, een bij het begin van de nok en een bij het einde van de nok.
Zoals uit het volgende hoofdstuk zal blijken, vormen niet de nokken of de dammen, maar de tikken de belangrijkste informatiebron van de CD.

7.1 Het CD-systeem

De putjes zijn uiteraard niet willekeurig op het oppervlak aangebracht, maar volgens een spiraalvormig spoor. Deze spiraal heeft ongeveer 20.000 windingen hetgeen overeen komt met ongeveer 600 windingen per millimeter!

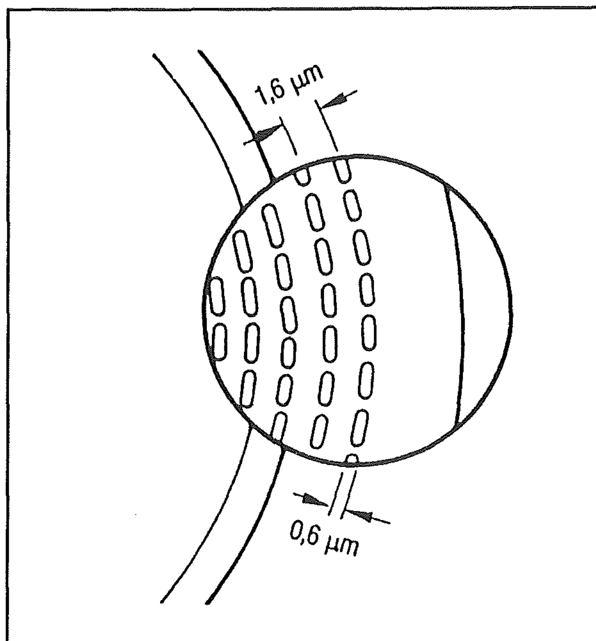
De windingen van de spiraal hebben een onderlinge afstand van 1,6 µm. De nokken hebben een diepte van 0,12 µm, een breedte van 0,6 µm en een lengte van 0,8 tot 3,5 µm.

Figuur 5/7.1-5 geeft een voorstelling van het oppervlak van een compact disk.

Afwerking van de plaat
De bovenzijde van de compact disk, dus de zijde waar de nokken in geperst zijn, wordt afgedekt met een zeer dunne laag opgedampt aluminium. Deze laag heeft een dikte van slechts 0,04 µm en is dus zeer kwetsbaar. Vandaar dat deze laag wordt afgedekt met een ongeveer 0,1 mm dikke laag van een harde beschermlak. Op deze laklaag wordt nadien nog de labelinformatie gedrukt.

De opgedampte laag aluminium geeft de onderzijde van de CD het typische spiegelende uiterlijk.

De CD in de speler
De compact disk wordt in de lade van de CD-speler gelegd en wordt, na het sluiten van de lade, opgevangen door een conische spindel.
Deze spindel zorgt ervoor dat de CD volkomen centrisch zal gaan draaien. Dat is een uitermate belangrijke voorwaarde. Een excentriciteit van slechts 0,1 mm heeft tot gevolg dat er niet minder dan 60 windingen van de spiraal boven de optische pick-up heen en weer slingeren!



Figuur 5/7.1-5: De nokken worden in het oppervlak van de CD geperst en worden gescheiden door de dammen.

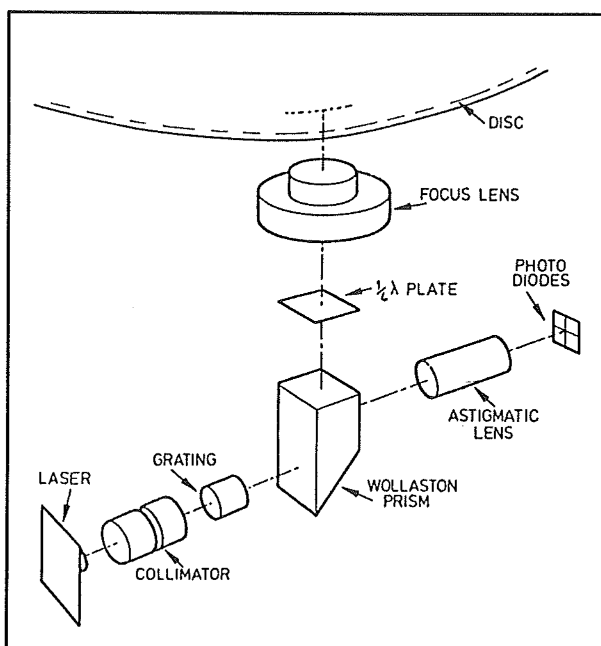
Na het starten van de speler zal de CD gaan ronddraaien met een niet constant toerental. Dat is dus een grote tegenstelling tot de traditionele draaitafel, waar alles wordt verzonnen om het toerental van de plaat zo constant mogelijk te houden. Het toerental van de CD schommelt tussen de 500 en 200 toeren per minuut. Dat toerental wordt automatisch zo geregeld dat er een constante datastroom wordt uitgelezen. Kleine afwijkingen in het toerental hebben geen enkel effect op de kwaliteit van het geluid. De van de CD gelezen digitale informatie wordt immers in een buffergeheugen opgeslagen. Gelijktijdig wordt dit geheugen echter op het ritme van een kristaloscillator weer uitgelezen. De elektronica in de CD-speler bepaalt de "mate van vulling" van dit geheugen en zal de motor sneller laten draaien als het geheugen leeg dreigt te raken. Door de hogere omwentelingssnel-

heid van de CD zullen er meer data worden aangevoerd, waardoor het geheugen weer gevuld wordt.

Het uitlezen van de compact disk met de optische pick-up

De compact disk wordt aan de onderzijde afgetast door een zeer dunne monochromatische lichtbundel. Dat aftasten gebeurt van binnen naar buiten, hetgeen alweer in tegenstelling is tot de manier waarop een langspeelplaat wordt afgetast.

De lichtstraal wordt geleverd door de zogenaamde optische pick-up. Dat is een klein onderdeeltje dat via een gleuf in de CD-lade de onderzijde van de CD kan beschijnen. Het licht wordt geleverd door een halfgeleiderlaser, een zogenaamde laserdiode. Deze diode straalt monochromatisch licht uit met een golflengte van ongeveer 800 nm.



Figuur 5/7.1-6: De principiële werking van de optische pick-up.

De fundamentele samenstelling van de optische pick-up is getekend in figuur 5/7.1-6.

De laserdiode zendt via een aantal lenzen de dunne lichtstraal naar een prisma. Daar wordt de straal over 90° afgebogen. De laserbundel wordt vervolgens door een 1/4 λ plaat gepolariseerd. Deze plaat is min of meer te vergelijken met een faseverschuiver, die de golffronten van de uitgezonden straling 90° vertraagt. Nadien wordt de straal door middel van de focusseringslens gericht op de reflecterende aluminium laag die op de bovenkant van de plaat is aangebracht. De lichtbundel wordt door deze laag teruggekaatst. De mate van terugkaatsing is afhankelijk van de structuur van het oppervlak van de laag dat op dat moment in het brandpunt van de straal zit. Een nok zal een ander terugkaatsingspatroon geven dan een dam.

Het teruggekaatste licht wordt weer door de polarisator geleid, zodat er een faseverschuiving van 180° bestaat tussen het door de laserdiode uitgezonden licht en het teruggekaatste licht. Dat heeft tot gevolg dat het prisma het teruggekaatste licht in een andere richting afbuigt. De afgebogen golven worden door een astigmatische lens op een stelsel van fotogevoelige dioden gefocusseerd. In deze dioden wordt de amplitudevariatie van het teruggekaatste licht omgezet in een elektrisch signaal.

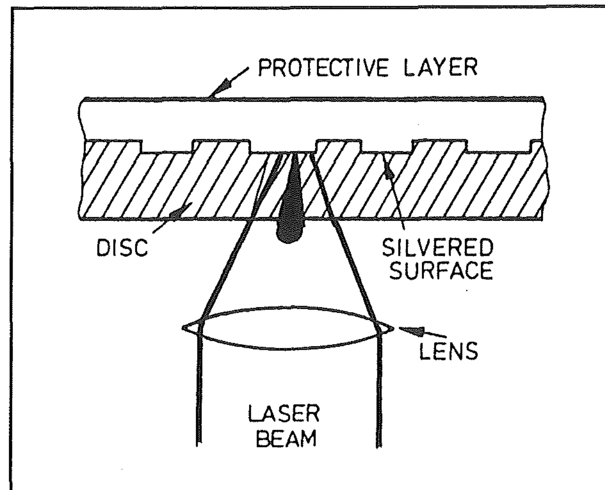
Deze dioden hebben nog twee andere zeer belangrijke functies. Aan de hand van informatie die de teruggekaatste lichtstraal verschaft leiden zij twee signalen af die ervoor zorgen dat de optische pick-up de windingen van de spiraal blijft volgen

en dat de laserstraal op de aluminium laag gefocusseerd blijft. Over deze zeer interessante technieken wordt het nodige uitgelegd in een van de volgende hoofdstukken.

Het geheim van het krasongevoelige oppervlak
Compact disks hebben ten opzichte van klassieke platen het grote voordeel dat de platen zonder bezwaar bestoft en bekrast kunnen worden zonder dat dit de weergavekwaliteit schijnbaar aantast. Schijnbaar, omdat deze stelling niet helemaal waar is! Ook de onderzijde van een CD moet kras- en stofvrij worden gehouden! Wel is het inderdaad zo dat kleine krasjes en stofjes in de meeste gevallen de weergave niet beïnvloeden. Hoe dat kan wordt duidelijk bij bestudering van figuur 5/7.1-7.

De lichtstraal heeft een diameter van ongeveer 0,8 mm op het moment dat het oppervlak van de plaat wordt geraakt. De lens zorgt ervoor dat 1,1 mm dieper, dus daar waar de nokken en dammen liggen, de middellijn van de spot slechts ongeveer 1 µm is.
Deze zeer sterke bundeling heeft tot gevolg dat een stofje dat op het oppervlak ligt een heel dunne schaduwkegel vormt op de aluminium laag. Dit kleine plekje zonder licht heeft nauwelijks gevolgen voor de hoeveelheid licht die wordt teruggekaatst door een nok of een dam.

Bovendien detecteert het systeem, zoals later zal blijken, alleen de overgangen tussen nokken en dammen en tussen dammen en nokken, dus de tikken. Dat zijn de echte informatiedragers die zo weinig plaats innemen dat het al wel heel toevallig zou zijn als een stofje het uitlezen van een tik verhindert.



Figuur 5/7.1-7: Getekende vergroting van de plaats waar de lichtstraal het transparante lichaam van de CD binnen treedt.

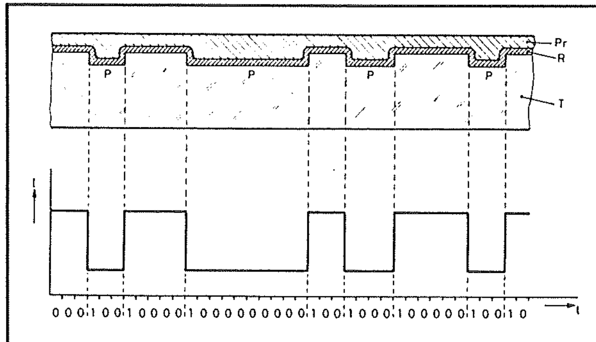
Bovendien is de CD-speler uitgerust met een indrukwekkend systeem, een schakeling die in staat is fouten in de uitgelezen digitale codes te detecteren en te herstellen.

Het gegevensformaat op de CD

De plaats van de digitale enen en nullen
Een van de grootste misverstanden die er bij de interpretatie van het CD-systeem wordt gemaakt is dat men denkt dat de nokken en de dammen corresponderen met enen en nullen uit de digitale code. Niets is echter minder waar!

Zoals uit figuur 5/7.1-8 blijkt staan zowel de nokken als de dammen op de plaat voor logische nullen.
Alleen de niveau-overgangen, dus de tikken staan voor logische enen.

7.1 Het CD-systeem



Figuur 5/7.1-8: Het verband tussen de digitale code en de dammen en nokken op het plaatoppervlak.

Deze techniek heeft een aantal voordelen die uitgebreid aan de orde zullen komen in de volgende hoofdstukken.
Op deze plaats wordt volstaan met het vermelden dat deze codering tot gevolg heeft dat er veel meer informatie op de CD kan worden opgenomen.

Het codeformaat en het raster
Zoals reeds gezegd ondergaat de fundamentele digitale geluidscode een heleboel bewerkingen en aanpassingen alvorens de gegevens in de CD worden geperst.

De digitale audiogegevens worden bovendien gemengd met diverse andere signalen.
Dat zijn:

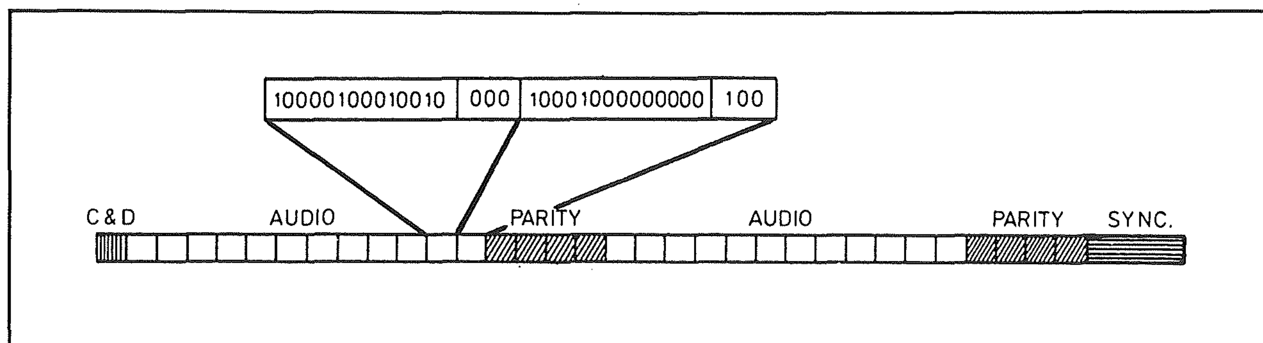
- De zogenaamde C&D-code, waarin extra informatie wordt ondergebracht, onder andere over de speelduur en het volgnummer van het muziekstuk dat gespeeld wordt.
  Dank zij deze informatie kan de optische pick-up snel bijvoorbeeld het derde nummer opzoeken.
- Acht in twee groepen van vier samengevoegde zogenaamde pariteitscodes, waarmee de elektronica van de CD-speler in staat is te onderzoeken of een uitgelezen code foutloos is ontvangen. Is dat niet het geval dan kan de elektronica aan de hand van de gegevens in deze codes de foutieve code herstellen, zodat het geluid niet wordt vervormd.
- Eén SYNC-code, die in de speler gebruikt wordt voor het herwinnen van de klokfrequentie waarmee de bits op de plaat zijn geschreven.

Al deze gegevens worden in een specifiek patroon in de windingen van de plaat aangebracht.
Een zo'n patroon noemt men een raster of frame en de samenstelling is getekend in figuur 5/7.1-9.

Per frame worden er zes monsters van beide audiokanalen verwerkt. Omdat er, zoals reeds bekend, bemonsterd wordt met een frequentie van 44,1 kHz moeten er dus 44.100 gedeeld door 6 is gelijk aan 7.350 rasters per seconde op de plaat worden gezet.

Ieder vierkantje in figuur 5/7.1-9 stelt een CD-byte voor.
De 2 x 6 audiomonsters worden ondergebracht in 2 x 12 CD-bytes om de heel eenvoudige reden dat het te complex zou zijn om de 16-bit woorden van het gedigitaliseerde geluid in een keer te verwerken. Deze worden opgesplitst in twee bytes van 8 bit.

In totaal bevat een frame dus:
01 x C&D-bit;
12 x AUDIO-bits;
04 x PARITY-bits;
12 x AUDIO-bits;
04 x PARITY-bits;
01 x SYNC-bit.



Figuur 5/7.1-9: De samenstelling van een frame of raster op het oppervlak van de CD.

Om redenen die later worden toegelicht bestaat een CD-byte niet uit 8 bit, zoals gebruikelijk in de digitale techniek, maar uit niet minder dan 17 bits. Daarvan dragen 14 bits de eigenlijke informatie en worden drie extra bits toegevoegd om redenen die in een volgend hoofdstuk uitvoerig aan de orde komen.

Blokschema van een CD-speler

Inleiding

Aan de hand van de tot nu toe verstrekte gegevens is men in staat de functie van de verschillende elektronische blokken waaruit een CD-speler is samengesteld in grote lijnen te doorgronden.
De elektronica van de speler kan in twee grote delen worden gescheiden.

De meeste schakelingen werken digitaal en hebben tot taak de optische code van de CD uit te lezen en weer om te zetten in de foutloze fundamentele digitale 16-bit audiocodes.
Daarnaast zorgen deze schakelingen voor het in het spoor houden van de optische pick-up en voor het focusseren van de straal op de reflecterende aluminium laag op de bovenzijde van de plaat. Dat is niet zo eenvoudig als het lijkt, want de afmetingen van de dammen en putten zijn zo klein dat een CD die niet helemaal centrisch draait of een beetje hobbelig is immens grote correcties in de positionering van de pick-up en focussering van de lens nodig heeft.
Tot slot zorgt de digitale elektronica voor het besturen van de motor zodat steeds voldoende gegevens worden aangevoerd vanaf de plaat om het reeds genoemde buffergeheugen niet leeg te laten lopen.

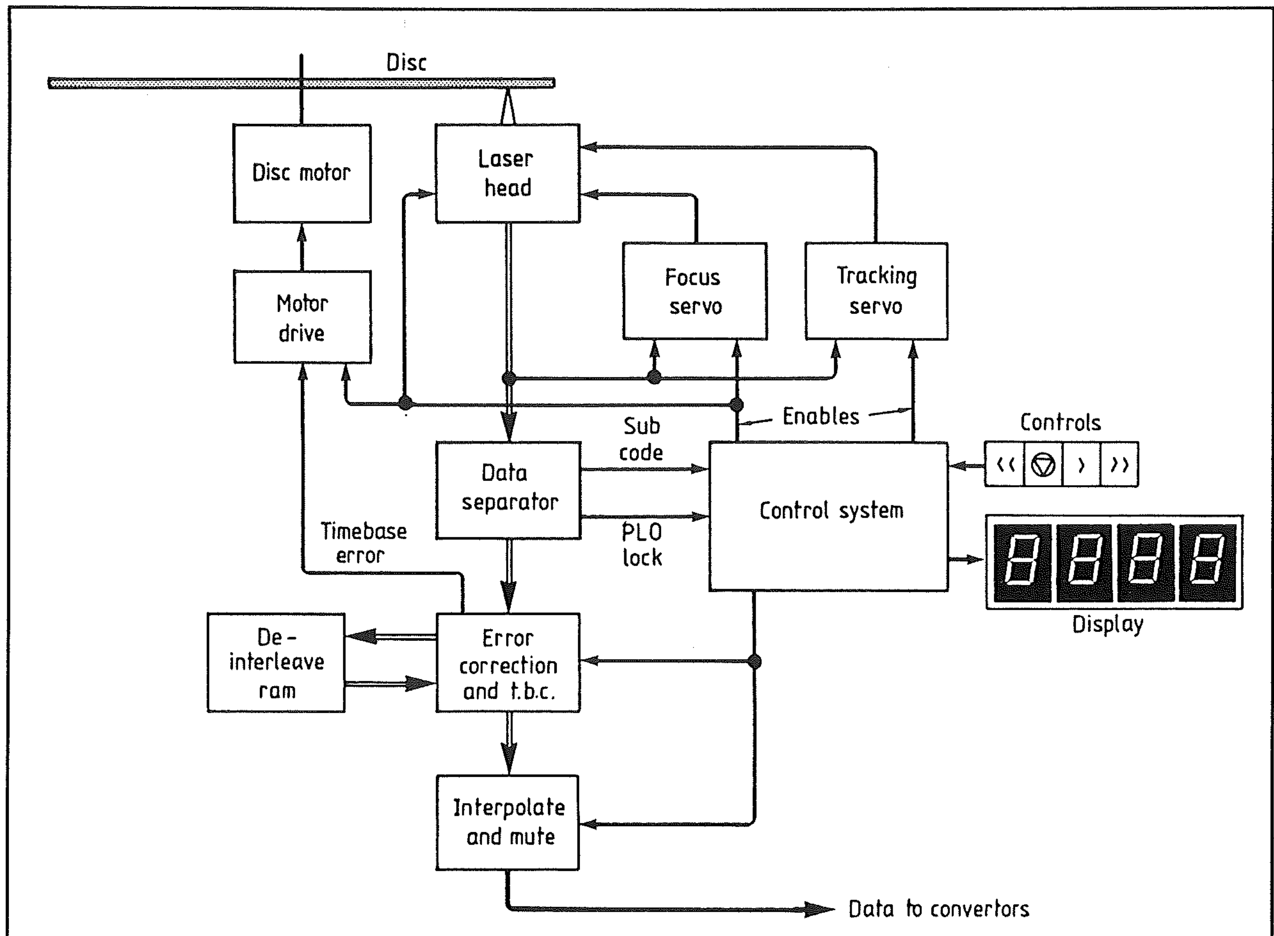
De analoge elektronica heeft tot taak de fundamentele digitale audiocodes weer om te zetten in twee analoge signalen.

De digitale elektronica

Het blokschema van het digitale deel is getekend in figuur 5/7.1-10.

Uit de gegevens die de optische pick-up "Laser head" levert worden signalen afgeleid voor het besturen van twee servoschakelingen.
De "Focus servo" stuurt een systeem dat de lens in de pick-up op en neer kan bewegen waardoor steeds scherp gesteld wordt op de aluminiumlaag van de CD.
De "Tracking servo" stuurt een systeem dat de laserstraal steeds op de windingen van de spiraal richt.

7.1 Het CD-systeem



Figuur 5/7.1-10: Het blokschema van de digitale elektronica in een CD-speler.

Beide servo's worden ook gestuurd uit het "Control system". Dit blok bestaat uit de besturingsmicroprocessor die de pick-up na het inleggen van de plaat naar de eerste windingen van de spiraal stuurt.

De uitgelezen gegevens gaan naar de "Data separator". In dit blok worden de verschillende gegevens die in de rasters zitten verweven van elkaar gescheiden.
De gegevens in het C&D-bit, de subcode genoemd, gaan naar het "Control system" en worden door de microprocessor gedecodeerd en geschikt gemaakt voor het besturen van het "Display" of de twee servo's als er een bepaald muziekstuk opgezocht moet worden.

De gegevens uit het SYNC-bit worden gebruikt om een PLL (Phase Locked Loop) aan te sturen waarmee een klokoscillator wordt gestuurd. Op deze manier wordt de klok waarmee de gegevens op de CD zijn gezet herwonnen en kan het juiste aantal digitale nulletjes tussen de enen van de tikken worden tussen gevoegd.

De audiogegevens gaan vervolgens naar het blok "Error correction and t.b.c". Hierin worden de uitgelezen codes onderzocht op geldigheid. Wordt een niet geldige code gevonden, dan worden de gegevens uit de PARITY-bits ter hulp geroepen om de code zo goed mogelijk te herstellen.

7.1 Het CD-systeem

Nadien worden de 2 x 17 bit codes die één audiosample vertegenwoordigen weer omgezet in een traditionele 16 bit brede binaire code. Deze code is de getrouwe reproductie van het fundamentele digitale audiowoord dat bij het fabriceren van de CD ter beschikking stond.

Het "De-interleave RAM" is het reeds genoemde buffergeheugen waarin de van de plaat komende codes worden opgeslagen. Dit RAM wordt op het ritme van een kristalgestuurde klok uitgelezen. De "Error correction and t.b.c" controleert de "vullingsgraad" van dit geheugen. Gaat de motor die de plaat aandrijft te traag draaien dan worden er sneller gegevens uit dit geheugen gelezen dan er worden ingeschreven. De vullingsgraad daalt. Het genoemde blok stuurt dan een "Timebase error" signaal naar de "Motor drive". Deze schakeling zal de diskmotor sneller laten draaien zodat er meer gegevens worden uitgelezen en de vullingsgraad van het "De-interleave RAM" weer stijgt.

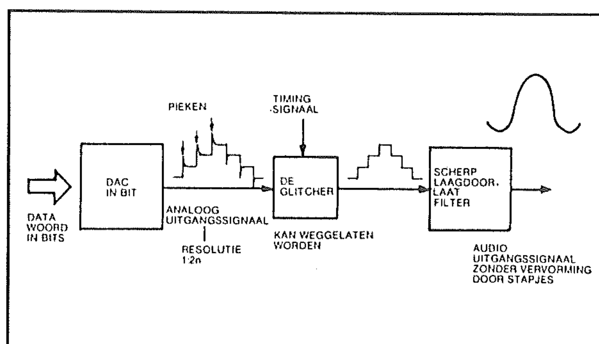
Het laatste digitale blok is de "Interpolate and mute". Als de uitgelezen CD-codes zo verminkt zijn dat de "Error correction" niet in staat is de code te herstellen wordt een tweede foutcorrectie ter hulp geroepen. De onbruikbare codes worden dan vervangen door geïnterpoleerde codes, die berekend worden uit de voorgaande en de volgende codes. Men gaat er van uit dat er in audiosignalen geen plotselinge niveauwijzigingen optreden. De analoge waarde van ieder sample zal dus ongeveer gelijk zijn aan het gemiddelde van de analoge waarden van het vorige en het volgende sample.
Deze waarde wordt door de microprocessor berekend en omgezet in een geïnterpoleerde code die de onbruikbare verminkte code van de plaat vervangt. Gelijktijdig wordt echter een "Mute-functie" ingeschakeld. Deze zal het volume van het uitgangsniveau verlagen, zodat de geïnterpoleerde code geen hoorbare tikken in het geluid tot gevolg heeft.

De gegevens op zwaar mishandelde en zeer beschadigde gedeelten van een CD die niet meer uit te lezen zijn worden dus toch zo goed als het gaat vervangen door berekende kunstmatige benaderingen van het originele geluidssignaal. Maar het volume wordt tijdelijk verlaagd, zodat de luidsprekers en de oren van de toehoorder worden gespaard als de microprocessor er ook maar wat van maakt.

De analoge elektronica
Het blokschema van het analoge deel van de elektronica in een CD-speler is getekend in figuur 5/7.1-11.

Het herwonnen fundamentele audiowoord wordt aangeboden aan een digitaal naar analoog omzetter, een DAC.
Men zou verwachten dat deze schakeling per definitie met een resolutie van 16 bit werkt. Het originele audiosignaal werd immers met een resolutie van 16 bit gedigitaliseerd.
Zoals zal blijken bij de gedetailleerde bespreking van de signaalverwerking in hoofdstuk 5/7.5 bestaan er echter ook spelers die met slechts 14 bit werken. Er bestaan zelfs een stuk of vijf verschillende systemen om de digitale code weer in een analoog signaal om te zetten, waarbij begrippen als "digitale filtering" en "oversampling" overbekend zijn geworden door de advertenties van de diverse fabrikanten. Al deze systemen worden in het genoemde hoofdstuk uitvoering behandeld.

7.1 Het CD-systeem



Figuur 5/7.1-11: Het blokschema van het analoge deel van de elektronica in een CD-speler.

Na de DAC volgt soms een zogenaamde "Deglitcher". Dat is een schakeling die de pieken in het analoge signaal die ontstaan bij het digitaal naar analoog procédé uit het signaal verwijderd.

Tot slot wordt het trapvormige analoge signaal aangeboden aan een scherp afsnijdend laagdoorlaatfilter dat tot taak heeft het signaal af te ronden zodat er een continu variërend analoog signaal ontstaat. Het filter zorgt er bovendien voor dat de bemonsteringsfrequentie van 44,1 kHz volledig uit het uitgangssignaal wordt werwijderd.

Specificaties in het kort

Inleiding

Tot slot van dit inleidende hoofdstuk worden de specificaties van het volledige CD-systeem samengevat.

Specificaties van de compact disk

- Diameter: 120 mm
- Dikte: 1,2 mm
- Samenstelling: transparante kunststof, aluminium reflectielaag, beschermlak
- Diamater centreergat: 15 mm
- Diameter eerste winding spiraal: 50 mm
- Diameter laatste winding spiraal: 160 mm
- Leessnelheid: 1,2 tot 1,4 m/s
- Toerental: 200 tot 500 toeren per minuut
- Speeltijd: maximaal 60 minuten
- Aantal spiraalwindingen: 20.000
- Afstand tussen windingen: 1,6 µm
- Spoorbreedte: 0,6 µm

Specificaties van het systeem

- Aftastfrequentie: 44,1 kHz
- Resolutie: 16 bit per kanaal
- Gegevensdichtheid: 4,3218 MB/s
- Aantal kanalen: maximaal vier
- Frequentiebereik: 20 Hz tot 20 kHz
- Signaal/ruis verhouding: 96 dB maximaal
- Dynamiek: 96 dB maximaal
- Kanaalscheiding: 96 dB maximaal
- Vervorming: 0,05 % maximaal

7.1 Het CD-systeem

5/7.2

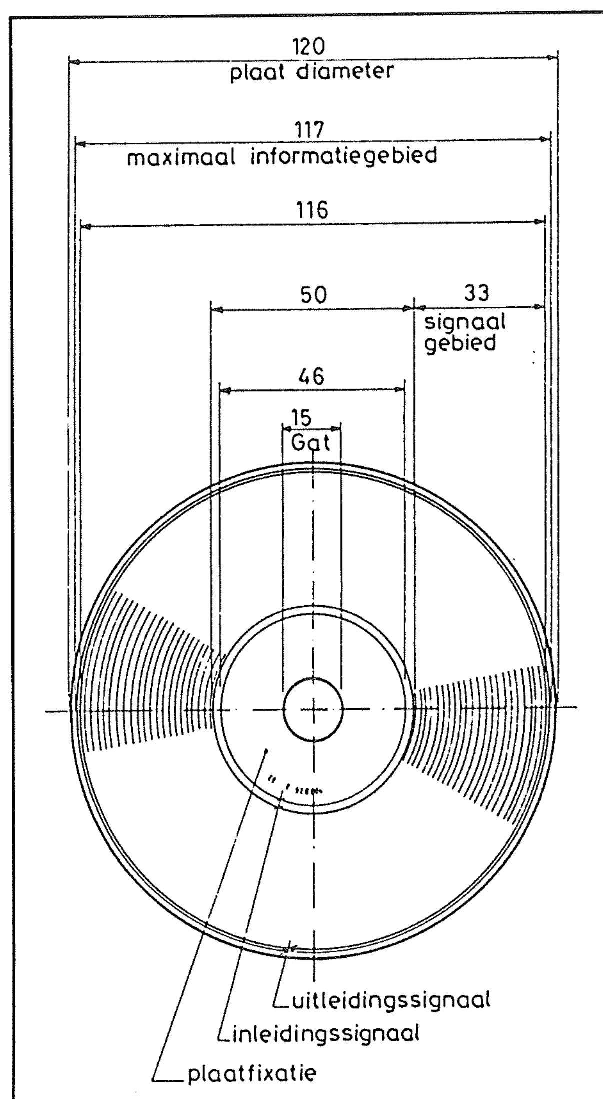
De compact disk

Fysische kenmerken

De afmetingen van de compact disk
De compact disk heeft een diameter van 120 mm en een centreergat van 15 mm. De belangrijkste afmetingen zijn samengevat in figuur 5/7.2-1.

Aan de positie van het centreergat worden zeer hoge eisen gesteld. Een excentriciteit van 0,1 mm veroorzaakt al een afwijking in de spiraal van 60 windingen! In de eerste fasen van de fabricage van de plaat bestaat er slechts een zeer klein gat in het midden van de plaat. Later wordt dit gat uitgeponst tot de echte afmeting. De juiste plaats wordt bepaald met een laserstraal die de exacte positie van de eerste en van de laatste winding van de spiraal opzoekt. Een computer berekent uit deze gegevens het exacte middelpunt van de spiraal. Het gat wordt op deze coördinaten geponst, waaruit volgt dat het gat wel enigszins excentrisch ten opzichte van het middelpunt van de plaat kan staan.

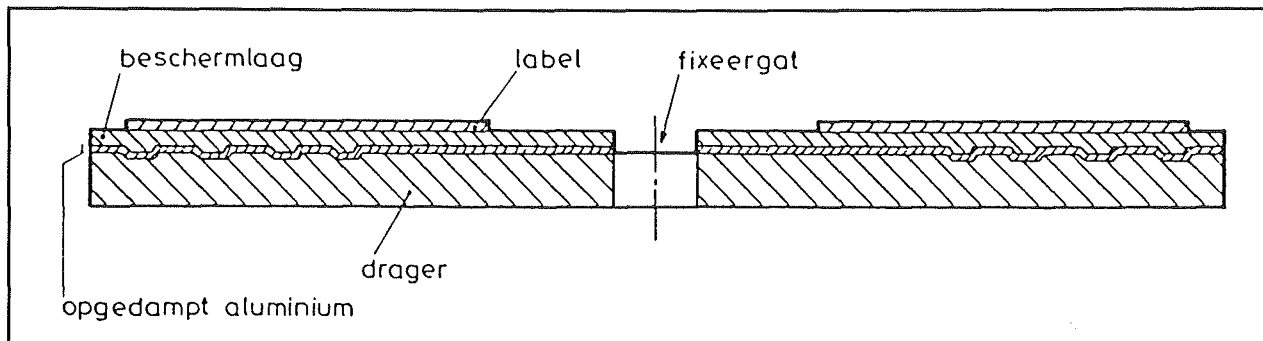
Het eigenlijke signaalgebied is slechts 33 mm breed. Voor dit gebied is een strook van 2 mm opgenomen waarin de algemene plaatgegevens zijn opgenomen. In deze zône worden de gegevens over de speelduur van de plaat, het aantal muziekstukken enzoverder genoteerd.



Figuur 5/7.2-1: De afmetingen van de compact disk.

Bij het spelen zal de microprocessor de optische pick-up naar deze zône leiden.

7.2 De compact disk



Figuur 5/7.2-2: Een doorsnede door een compact disk.

De twee servosystemen worden geregeld tot de laserstraal precies op de windingen staat ingesteld en precies gefocusseerd wordt op de aluminium laag.

De doorsnede door een compact disk is getekend in figuur 5/7.2-2.

Ook aan de toleranties in de diktemaat worden nauwe grenzen gesteld. De totale plaat heeft een dikte van 1,2 mm die binnen de 0,1 mm constant moet blijven over het gehele oppervlak van de plaat. De vlakheid van de plaat mag niet meer dan 0,6 ° afwijken in positieve of negatieve zin.

De drager

De drager bestaat uit acryl-plastic of polycarbonaat. Dit materiaal is uiteraard niet willekeurig gekozen maar moet aan enige eisen voldoen.
Op de eerste plaats moet het materiaal goed transparant zijn voor de golflengte van de laserstraal. Er wordt gebruik gemaakt van rode lasers met een golflengte van rond de 780 nm en de drager mag deze golflengte zo min mogelijk verzwakken.
Op de tweede plaats worden er bepaalde eisen gesteld aan de brekingsindex van het materiaal. Zoals bekend zal een lichtbundel worden afgebogen als deze van een medium doordringt in een ander. Bij de compact disk werkt deze brekingsindex twee maal op de straal in, namelijk als de straal van de lucht in de drager dringt en nadien als de teruggekaatste straal weer van de drager in de lucht tussen plaat en optische pick-up terecht komt. Zoals later zal blijken speelt deze brekingsindex een belangrijke rol bij het focusseren van de straal op de aluminium laag.
Op de derde plaats worden er bepaalde technologische eisen gesteld aan het dragermateriaal. Zo moet het thermoplastisch zijn, zodat het zich goed in de gietvormen voegt bij de fabricage van de plaat.
Tot slot, dat zal duidelijk zijn, is het van belang dat het materiaal tamelijk krasvast is. Hoewel het systeem redelijk ongevoelig is voor kleine krasjes op het oppervlak van de drager kan iedere kras tot gevolg hebben dat het foutcorrectiesysteem in de speler moet gaan werken. Een krasje kan bovendien de servoschakelingen even in de war brengen, waardoor het regelmechanisme extra moet gaan werken om de straal precies in focus te houden.

De afwerking van de drager

Na het inpersen van de putjes in het oppervlak wordt dit afgedekt met een aluminium laag die de compact disk de noodzakelijke reflecterende eigenschappen geeft. De platen gaan daartoe in een

7.2 De compact disk

vacuüm en in ongeveer 10 minuten wordt een laagje zuiver aluminium met een dikte van slechts 0,04 μm aangebracht.

Deze laag is uiteraard vanwege deze dikte uitermate kwetsbaar. Vandaar dat het gemetaliseerde oppervlak onmiddellijk wordt afgedekt met een 0,1 mm dikke laag taaie lak die er overheen wordt gegoten.

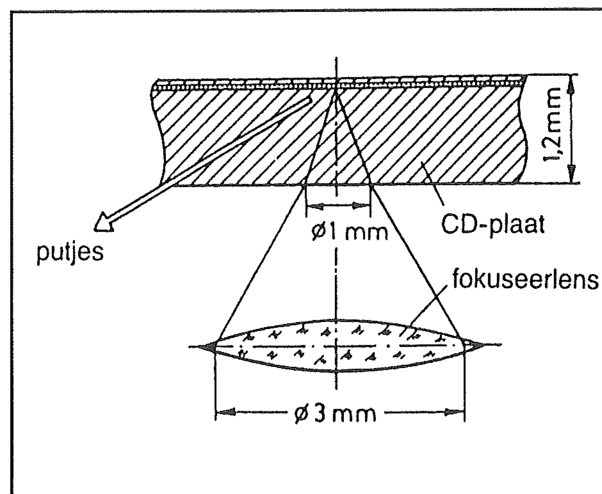
Tot slot wordt in een latere fase van de produktie over deze taaie laklaag de labelinformatie gedrukt.

Zoals bekend in er een controverse ontstaan in de pers over dit label. Beweerd wordt dat de chemische eigenschappen van de drukinkt agressief inwerken op de afschermlak en na verloop van jaren de kans bestaat dat de labelinkt de aluminium laag gaat aantasten. Of dit zo is valt uiteraard nog niet te bewijzen. Wel zal het duidelijk zijn dat zelfs de geringste aantasting van de opgedampte laag de compact disk volledig onbruikbaar maakt!

De putten en de dammen

Lengte en breedte van de putten
De putten worden bij de fabricage van de plaat onder grote druk in het half vloeibare dragermateriaal geperst.
Om zoveel mogelijk informatie op een plaatje samen te persen moeten de putten zo klein mogelijk zijn. Er worden echter tal van technologische en systematische beperkingen gesteld aan de minimale afmetingen van de putjes.

De voornaamste systematische beperking is de zogenaamde numerieke apertuur van het optische systeem.



Figuur 5/7.2-3: Invloed van de brekingsindex van de drager op de focussering van de laserstraal.

Deze grootheid is gelijk aan het product van de openingshoek van de lichtstraal en de brekingsindex van de tussenstof. De openingshoek van de lichtstraal bepaalt de hoeveelheid licht dat door de pick-up weer kan worden opgevangen.

Acryl-plastic heeft een brekingsindex van 1,5. De invloed van deze factor is getekend in figuur 5/7.2-3. De door de lens gebundelde lichtstraal krijgt bij het binnentreden van de drager een extra breking, een gegeven waar men bij het bepalen van de brandpuntafstand van de lens terdege rekening mee moet houden!

Uit de optische theorie kan men berekenen dat voor het gegeven systeem een numerieke apertuur van 0,5 haalbaar is. Dat wil zeggen dat de afmeting van de lichtvlek in het brandpunt gelijk is aan 1 μm.

Om deze kleine lichtvlek nog goed te kunnen detecteren mogen de putten niet smaller zijn dan ongeveer 0,5 μm en moet de minimale lengte gelijk zijn aan 0,8 μm.

De diepte van de putten

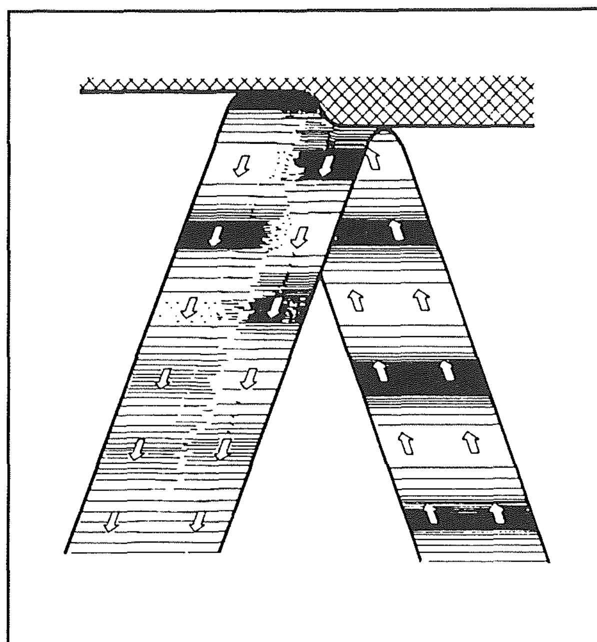
Een tweede even belangrijke grootheid is de diepte van de putten. Om de beperkingen aan deze grootheid te kunnen verklaren moet met twee zaken rekening gehouden worden.

Op de eerste plaats worden er weliswaar putjes in de plaats geperst, maar zal de laserstraal "bergjes" detecteren. De plaat wordt immers van de onderzijde afgetast en een ingeperst en gespiegeld putje wordt door de laserstraal gezien als een verhoging op het vlakke oppervlak van de plaat. Vandaar dat men liever van nokken dan van putjes spreekt.

Op de tweede plaats zendt een laserdiode een gepolariseerde monochromatische lichtbundel uit. Dat wil zeggen dat de golven in de lichtbundel dezelfde fase hebben en dat de golflengte van alle stralen gelijk is. Zoals bekend is de golflengte van het licht gelijk aan ongeveer 780 nm.

Als de straal door het vlakke oppervlak van de plaat wordt teruggekaatst zullen alle teruggekaatste golven nog steeds in fase zijn. De lichtbundel wordt door de terugkaatsing dus niet verzwakt. Anders wordt het echter als de straal invalt op een nokje. Zoals bekend is de diameter van de straal ongeveer twee maal zo groot als de breedte van een nokje. De helft van de straal valt dus op het nokje, de andere helft op het vlakke damgebied rond dit nokje. Wat er dan gebeurt bij een specifieke hoogte van de nok is getekend in figuur 5/7.2-4.

Als het nokje precies 1/4 golflengte hoog is, dan zal het gedeelte van de golven dat op het nokje invalt een afstand van precies 1/2 golflengte minder moeten afleggen dan het gedeelte dat op de dam invalt.



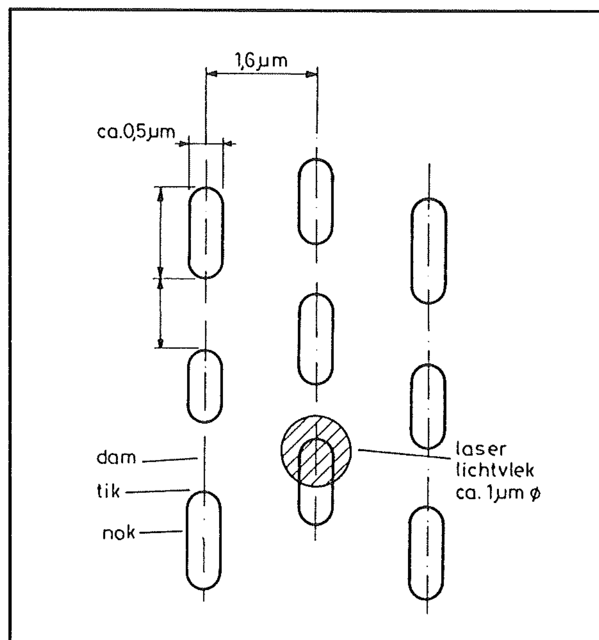
Figuur 5/7.2-4: Wat er gebeurt als de laserstraal op een nokje invalt.

Er ontstaat een faseverschuiving van precies 180 ° tussen de golffronten die door het putje en de golffronten die door de dam zijn teruggekaatst. Beide golffronten interfereren met elkaar en het resultaat is nul.

Besluit: als de hoogte van de nokken gelijk is aan 1/4 van de golflengte van het licht zal een nokje geen licht reflecteren en een dam wel. Dat is het basisprincipe van de werking van de compact disk!

De golflengte van het licht is gelijk aan 780 nm, de hoogte van een nok en dus de diepte van een putje moet gelijk zijn aan 190 nm. Omdat echter de eigenschappen van het dragermateriaal ook hier een rol spelen zal men in de praktijk de diepte van een put nog kleiner moeten maken. Men werkt met putjes die 120 nm of 0,12 µm diep zijn. Ter verduidelijking: dit is gelijk aan iets meer dan een tienduizendste millimeter!

7.2 De compact disk



Figuur 5/7.2-5: Overzicht van de positie van de nokken en de dammen in het oppervlak van de plaat.

Samenvatting
De positie van de nokken en de dammen op het plaatoppervlak is nog eens overzichtelijk samengevat in figuur 5/7.2-5.

Een put of nok is ongeveer 0,5 µm breed en wordt beschenen door laserlicht met een diameter van 1 µm. De windingen van de spiraal liggen precies 1,6 µm uit elkaar. Omdat er geen sprake is van breedtemodulatie zoals bij een plaat kan deze afstand constant blijven, wat ook het volume is van de opgenomen muziekpassage.

De lengte van de putten of nokken ligt tussen de 0,8 en de 3,5 µm.
De minimale lengte wordt bepaald door de diameter van de lichtvlek. Als de nokken korter waren zouden zij niet meer gedetecteerd kunnen worden door de straal met een diameter van 1 µm. De maximale breedte ligt niet technologisch vast, maar wordt bepaald door de codering van het signaal dat op de plaat wordt gezet. Dit wordt verklaard in het volgende hoofdstuk.

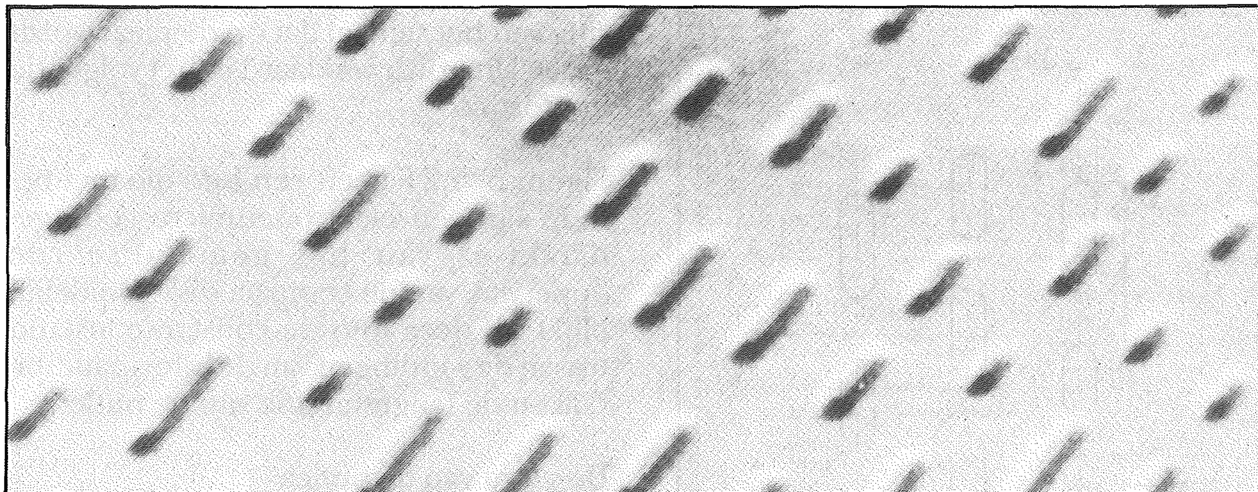
Figuur 5/7.2-6 geeft een foto die met behulp van een elektronenmicroscoop gemaakt is van het gemetaliseerde oppervlak van de compact disk. Duidelijk blijkt uit deze foto de constante afstand tussen de windingen van de informatiespiraal en de lengtevariatie van de putjes.

De vorm van de putjes
Uit de foto gemaakt met een elektronenmicroscoop blijkt duidelijk dat de putjes geen scherpe randen hebben maar enigszins afgerond zijn. Dat heeft weer bepaalde vervelende consequenties voor het signaal dat wordt uitgelezen en is de oorzaak van een van de vele noodzakelijke code-omzettingen. Het valt immers te verwachten dat het elektrische signaal dat door de fotodetectoren geleverd wordt een tamelijk grote stijgtijd heeft.

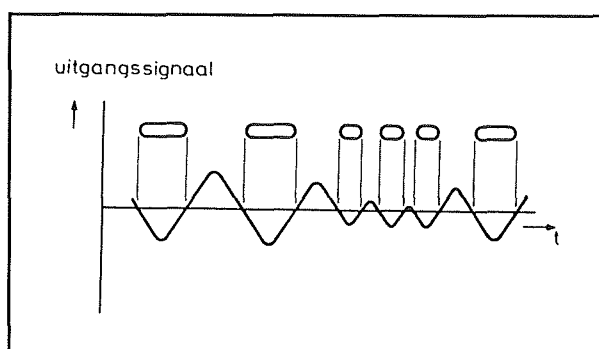
De vorm van het uitgelezen signaal is weergegeven in figuur 5/7.2-7 en dit signaal is enigszins driehoekvormig en bovendien niet constant in grootte.

De grote stijg- en daaltijden worden bepaald door de onscherpe overgang tussen put en dam. Dat de grootte van de puls afhankelijk is van de lengte van de put heeft te maken met de fysische en elektronische beperkingen van de fotodetectoren. In ieder geval blijkt dat het uitgelezen signaal geen mooie blokgolf is. Er moet dus een soort Schmitt-trigger tussen geschakeld worden. Zoals uit het volgende hoofdstuk zal blijken kan deze schakeling alleen goed werken als er iets speciaals wordt gedaan met de codering van het signaal.

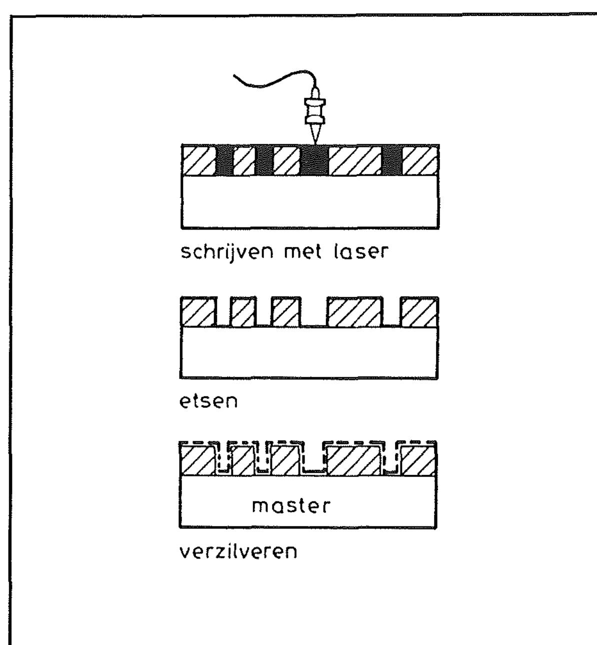
7.2 De compact disk



Figuur 5/7.2-6: Het oppervlak van een CD door een elektronenmicroscoop 8.125 keer vergroot en gezien van de bovenzijde.



Figuur 5/7.2-7: Het verband tussen de lengte van de nokken en het elektrische signaal dat de fotodetectoren leveren.



Figuur 5/7.2-8: De vervaardiging van de master.

De fabricage van een CD

Inleiding

De fabricage van een compact disk volgt in grote lijnen dezelfde stappen die ook worden toegepast bij de productie van een traditionele langspeelplaat.

In de eerste fase wordt een master gemaakt. Nadien worden van deze master een groot aantal "vaders" en "moeders" gemaakt, die worden gebruikt als basis voor het persen van de CD's.

Dat heeft als voordeel dat de slijtage van de unieke master tot een minimum wordt beperkt.

De master

De fabricage van de master wordt beschreven aan de hand van figuur 5/7.2-8.
Als basis wordt een glazen schijf gebruikt met een diameter van 30 cm. Het opper-

7.2 De compact disk

vlak van deze schijf wordt gepolijst en voorzien van een dunne fotogevoelige laag. Ook deze laag wordt gepolijst.

Deze schijf wordt in een opnameapparaat belicht door een laser. De laser beschrijft een spiraalvormige baan over het oppervlak en het uitgestraalde licht wordt gemoduleerd door de zogenaamde kanaalbitstroom. Dat is de uiteindelijke informatiecode, afgeleid van de twee binaire codes die ontstaan door het linker en rechter geluidssignaal te digitaliseren.

De belichte glazen schijf wordt vervolgens ontwikkeld. Daar waar de fotogevoelige laag werd getroffen door het licht van de laser zal deze laag oplossen. Het patroon van dammen en nokken is nu dus aanwezig in de fotogevoelige laag.

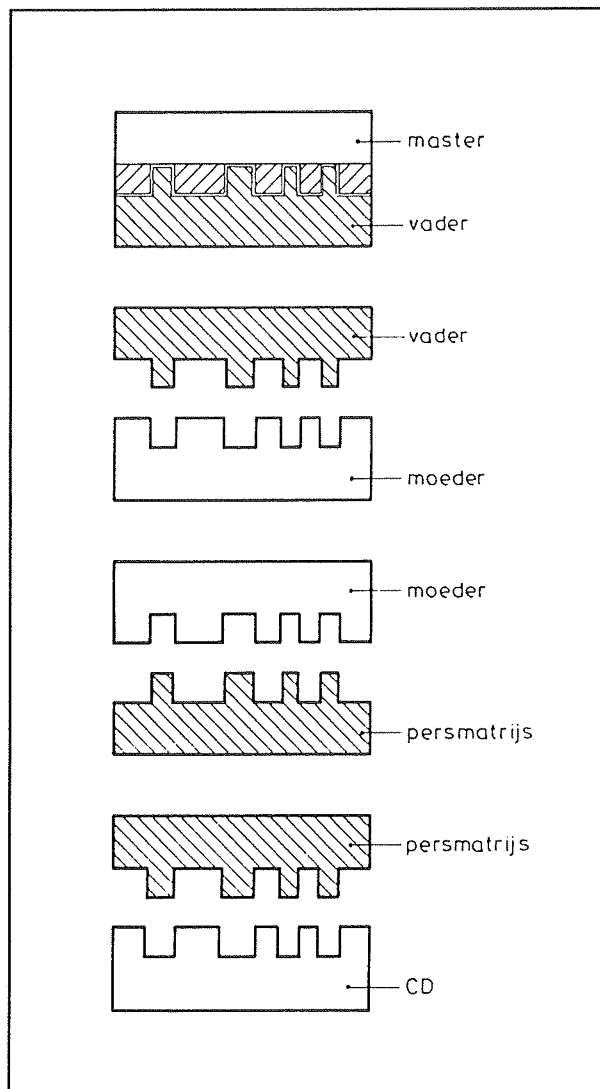
Dit reliëf wordt elektrisch geleidend gemaakt door er een dun laagje zilver op te dampen.

Hiermee is de master klaar. Deze plaat wordt uiterst zorgvuldig zowel optisch als acoustisch gecontroleerd.
Blijken er fouten in te zitten, dan wordt onverbiddelijk een nieuwe master aangemaakt.

De "vaders" en de "moeders"

De master of basismatrijs is tamelijk kwetsbaar en bovendien erg duur. Het zou dus onzin zijn deze plaat te gebruiken voor het persen van de duizenden compact disks.

Vandaar dat uit deze ene master een groot aantal persmatrijzen wordt afgeleid. Men gebruikt hiervoor de beproefde kopieertechnieken die ook worden gebruikt bij de productie van langspeelplaten.



Figuur 5/7.2-9: De productie van de "vaders" en de "moeders".

Omdat alle afmetingen op een CD echter veel en veel kleiner zijn dan deze op een plaat worden er veel hogere eisen gesteld aan de atmosfeer van de fabrieken waarin de platen worden gemaakt. Het grootste deel van de productie gebeurt in zeer stofvrije ruimtes, waar zelfs de werknemers niet worden in toegelaten!

De productie van de "vaders" en de "moeders" wordt toegelicht aan de hand van figuur 5/7.2-9.

7.2 De compact disk

Van de master wordt eerste een vader gemaakt. Dit gebeurt galvanisch door op de geleidende master een laag nikkel aan te brengen. Om er zeker van te zijn dat de vader van de master te scheiden is wordt de master echter eerst voorzien van een zeer dunne laag van een passiveringsmateriaal. Zonder deze laag zouden de nikkelmoleculen zich gaan binden met de zilvermoleculen op de master en zouden de twee delen niet meer te scheiden zijn.

De gepassiveerde master gaat in een galvanisch bad en er wordt met de bekende galvaniseertechnieken een laag nikkel op afgezet. Als deze laag dik genoeg is wordt het geheel uit het bad gehaald. De vader wordt nu voorzichtig losgeklopt van de master. Het oppervlak van de vader bevat nu de kanaalbitstroom, maar uiteraard geïnverteerd. Wat een nok is op de master is een dam op de vader en vice versa.

Nadien wordt op precies dezelfde manier van de vader een moeder gemaakt. De moeder is dus een exacte kopie van de master, zij het dat de moeder uit nikkel is samengesteld.

Het maken van de persmatrijzen
De moeder wordt nu weer gebruikt voor het maken van een aantal persmatrijzen. Dat gebeurt alweer op dezelfde manier, dus via een galvanisch proces.

De CD-productie in de gietpers
De persmatrijs vormt het bovenste deel van de gietpers. Het onderste deel is een gepolijste plaat.
In de gietpers wordt het dragermateriaal, dus acryl-plastic, op een temperatuur van ongeveer 300 °C ingebracht. Bij deze temperatuur is dit materiaal zo vloeibaar als smeerolie.

Beide delen van de gietpers worden nu naar elkaar toe bewogen onder een druk van ongeveer 1000 bar tot de onderlinge afstand precies gelijk is aan 1,1 mm. De vloeibare massa acryl-plastic komt dus tussen beide delen van de gietpers onder hoge druk te staan zodat het overtollige materiaal naar buiten wordt geperst en de oppervlakken de structuur van de matrijsdelen overnemen. De onderzijde wordt spiegelglad, de bovenzijde neemt het patroon van nokken en dammen over.

De persmatrijs wordt afgekoeld tot onder de 100 °C zodat het acryl-plastic hard wordt. De twee delen van de matrijs wijken, men kan de compact disk uit de matrijs verwijderen en verder afwerken.

Het afwerken van de CD's
In de volgende stap wordt een voorlopig gat van 12 mm diameter in het middelpunt van de CD geponst en wordt het overtollige, naar buiten geperste gietmateriaal rondom verwijderd.

De CD's worden nu verzameld in een vacuümkast. Als deze gevuld is wordt de kast luchtledig gezogen en wordt de aluminium reflecterende laag in ongeveer 10 minuten op het oppervlak gedampt.

De volgende productiefasen zijn reeds beschreven en worden hier slechts gememoreerd:

- opgieten van de 0,1 mm dikke beschermlaag;
- aanbrengen van het 15 mm centreergat precies in het middelpunt van de informatiespiraal;
- drukken van de labels in een soort zeefdrukpers;
- eindcontrole van de compact disks.

5/7.3
De codering van het audio-signaal

Inleiding

De fundamentele kanaalbitstroom en de rasters
De gegevens worden op het oppervlak van de CD geregistreerd onder de vorm van een seriële code. Deze seriële code noemt men de kanaalbitstroom.
In een vorig hoofdstuk werd reeds verklaard hoe deze stroom gegevens niet continu op de plaat wordt gezet, maar onder de vorm van frames of rasters. Ieder raster bevat de digitale informatie over zes monsters van de twee audio-signalen. Er worden 7350 rasters per seconde geschreven.
In dit hoofdstuk wordt de lange weg die de analoge audio-signalen afleggen alvorens zij als frames op het oppervlak van de CD worden geschreven stap voor stap ontrafeld.

De samenstelling van een frame
De samenstelling van een frame is nog eens getekend in figuur 5/7.3-1.

Het frame is samengesteld uit in totaal 43 CD-bytes. Met opzet wordt gesproken over "CD-bytes", omdat deze bytes fundamenteel anders van samenstelling zijn dan de gebruikelijke 8 bit brede bytes die men kent uit de digitale techniek. Hoewel een CD-byte uit niet minder dan 17 bit bestaat heeft het toch zin om over bytes te spreken, omdat de werkelijke signaalinhoud overeen komt met deze van een gewoon 8 bit byte. De omzetting van 8 naar 17 bit is noodzakelijk vanwege het medium, de nokken en dammen op het oppervlak van de compact disk.

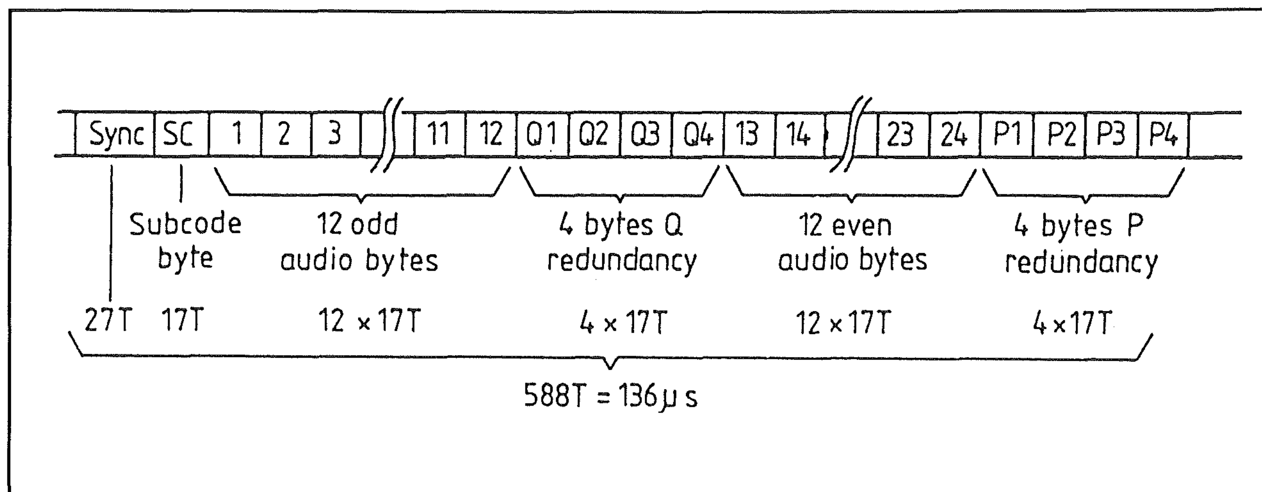
Een frame bestaat uit:

- Het SYNC-byte:
  Dit eerste CD-byte bestaat uit 27 bit T. Dit byte heeft dus een afwijkende lengte en dit is gedaan om dit byte duidelijk en onmiddellijk te kunnen onderscheiden van alle overige informatie. Dit byte wordt gebruikt voor het synchroniseren van een klokoscillator die op precies dezelfde frequentie moet oscilleren als de klokoscillator waarmee de bits op de master zijn vast gelegd.

- Het S&D-byte:
  Dit zogenoemde subcode byte is 17 bit lang en bevat de informatie die de microprocessor in de speler nodig heeft voor het selecteren van muziekstukken en voor het aangeven van bijvoorbeeld de totale speelduur van de plaat.

- De twaalf eerste audio-bytes:
  Deze bytes bevatten het eerste deel van de audio-informatie die in een frame wordt verpakt.

7.3 De codering van het audio-signaal



Figuur 5/7.3-1: De samenstelling van één frame op het oppervlak van de compact disk.

- De vier Q-PARITY bytes:
  In deze bytes wordt informatie opgeslagen waaruit de microprocessor in de speler kan afleiden of de ontvangen audio-bytes goed van samenstelling zijn. Wordt een leesfout in een byte geconstateerd, dan kan het foutcorrectie systeem aan de hand van de gegevens in deze Q (en de daarop volgende P) bytes proberen de code te herstellen.

- De twaalf volgende audio-bytes:
  Bevatten het tweede deel van de audio-informatie in het frame.

- De vier P-PARITY bytes:
  De functie van deze bytes is reeds besproken bij de Q bytes.

De verschillende signaalbewerkingen
Op de twee audiosignalen die in de studio ter beschikking staan als basis worden de volgende bewerkingen uitgevoerd:

- Digitaliseren:
  Dit proces omvat:
  - het bemonsteren van de analoge signalen tot 16 bit brede woorden;
  - het splitsen van de twee 16 bit lange bemonsteringscodes in 4 x 8 bit brede bytes;
  - het verzamelen van de gegevens van zes opeenvolgende monsters;
  - het groeperen van de even en oneven bytes uit deze monsters;
  - het aan elkaar rijgen van al deze gegevens tot een seriële code.

- Invoegen Q-PARITY bytes:
  Deze bytes worden berekend aan de hand van de samenstelling van de audio-bytes. Nadien worden deze vier bytes tussen de even en de oneven audio-bytes ingevoegd.

- De CIRC-modulatie:
  CIRC staat voor "Cross Interleaved Reed-Solomon Code". In deze stap worden alle bytes van een aantal frames op een zeer ingewikkelde manier door elkaar gehusseld. De bedoeling hiervan zal in de "CIRC"-paragraaf in dit hoofdstuk duidelijk worden.

- Invoegen P-PARITY bytes:
  Ook deze vier bytes worden berekend aan de hand van de samenstelling van

7.3 De codering van het audio-signaal

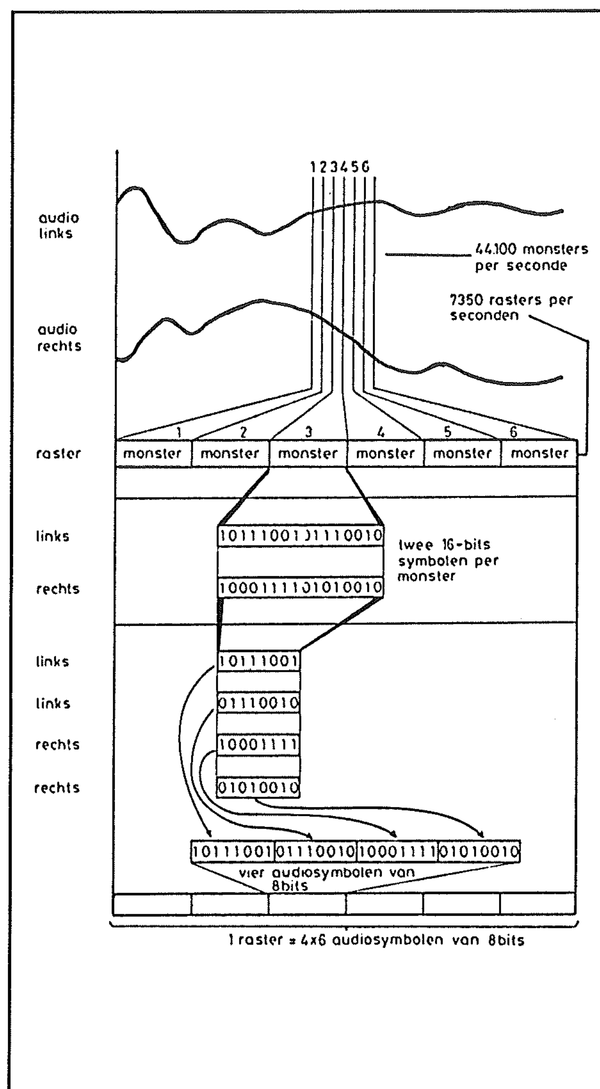
de nu door elkaar gegooide bytes van het frame. Nadien worden deze bytes aan de staart van de frame-informatie gekoppeld.

- Toevoegen Subcode byte:
  De samenstelling van dit byte wordt in de studio door een speciale computer berekend en op het juiste tijdstip in de frame-informatie gevoegd.

- EFM:
  Deze afkorting staat voor “Eight to Fourteen Modulation”.
  In deze stap worden de tot nu toe “normale” bytes omgevormd tot CD-bytes die een lengte hebben van 14 bit. Deze stap verlegt het accent van de informatie van de nokken en dammen naar de tikken, de overgangen van nokken naar dammen en vice versa.
  Bovendien zorgt deze modulatie ervoor dat de compact disk zijn speelduur van een uur krijgt.

- Minimaliseren DSV:
  Deze kreet staat voor “Digital Sum Value”.
  Door het toevoegen van drie extra bits aan ieder 14 bit lang byte wordt er voor gezorgd dat de code bij de overgang van het ene naar het andere byte blijft voldoen aan bepaalde afspraken en dat de gemiddelde spanningswaarde van het signaal zoveel mogelijk gelijk blijft aan nul.

- Toevoegen SYNC-byte:
  Zoals gezegd heeft dit byte een afwijkende lengte.
  Deze informatie wordt door een elektronische schakelaar op het juiste moment voor de rasterinformatie toegevoegd.



Figuur 5/7.3-2: Het omzetten van de analoge audio-signalen in reeksen digitale codes.

Stapsgewijze bespreking

Het zal duidelijk zijn dat de codering van de kanaalbitstroom een zeer ingewikkeld proces is.
In de volgende paragrafen zullen de acht opgesomde signaalbewerkingen en codeomzettingen afzonderlijk worden besproken.
Vaak zal dit bij eerste lectuur verwarrend lijken omdat enige bewerkingen alles met elkaar te maken hebben.

Digitaliseren

De fundamentele digitale audio-codes

Het digitalisatieproces van het analoge audio-signaal, is schematisch voorgesteld in figuur 5/7.3-2.
Het signaal wordt 44.100 keer per seconde bemonsterd met een resolutie van 16 bit, zodat er in totaal:
2 x 44.100 x 16 = 1.411.200
bit per seconde verwerkt moeten worden!

De audiosymbolen

De twee 16 bit woorden per monster worden vervolgens gesplitst in een LSB en een MSB, die beide uit 8 bit bestaan.
Deze vier bytes vormen de digitale representatie van één bemonstering en de 32 bit worden één audio-symbool genoemd. De audio-symbolen van zes opeenvolgend bemonsteringen worden tot slot samengevoegd tot één raster. Dit raster bestaat dus uit 32 audio-symbolen van ieder 8 bit.

Invoegen Q-PARITY bytes

Inleiding

Op een compact disk zitten miljarden nokjes, die ieder verantwoordelijk zijn voor het uitlezen van twee digitale "enen" uit de totale code. Het is zo goed als uitgesloten dat er ook maar één CD wordt geperst, waar niet duizenden van deze nokjes om de een of andere reden beschadigd zijn. Het is voldoende dat er tijdens het opdampen van de aluminium reflecterende laag een uiterst klein stofdeeltje op het oppervlak terecht komt om tientallen nokjes niet reflecterend te maken en dus niet uitleesbaar.

Ieder fout uitgelezen bit vervormt de uiteindelijk herwonnen fundamentele audio-codes. Als zo'n beschadigde code door de DAC in een analoog signaal wordt omgezet kan dit tot gevolg hebben dat er zeer korte maar zeer steile pieken in het analoge uitgangssignaal ontstaan. Iedere foutief uitgelezen code genereert dus een tik in de weergave.

Zonder uitgebreide foutcorrectiesystemen zou een compact disk waarschijnlijk nog harder spetteren en tikken dan zelfs de slechtste analoge langspeelplaat!

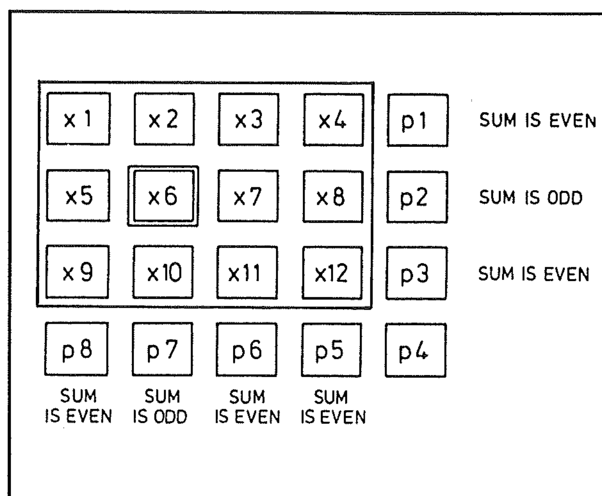
Omdat het CD-systeem digitaal werkt is het gelukkig geen enkel probleem zo veel foutcorrectiesystemen in te bouwen als men zelf wil. Er moet uiteraard wel een compromis gevonden worden tussen de kans dat er toch nog foutieve codes in de DAC's terecht komen en de elektronica die besteed moet worden aan de systemen in de spelers.

Matrixcodering en toevoegen bits

De Q-PARITY is de eerste stap in het ingewikkelde systeem van de totale foutcorrectie. De systematiek in het samenstellen van deze bytes is vrij eenvoudig en wordt vereenvoudigd uitgelegd aan de hand van figuur 5/7.3-3.

De audio-symbolen worden omgezet in een matrix, die bestaat uit een aantal horizontale en een aantal vertikale lijnen. Op ieder snijpunt van een horizontale met een vertikale lijn wordt een bit geplaatst.
In de figuur is dat op vereenvoudigde schaal voorgesteld door de bits x_1 tot en met x_{12}, die zijn opgenomen in een matrix met drie horizontale en vier vertikale lijnen.

7.3 De codering van het audio-signaal



Figuur 5/7.3-3: Verklaring van de samenstelling van de pariteits-bytes.

Aan iedere rij en aan iedere kolom wordt nu een pariteitsbit toegevoegd (p_1 tot en met p_3 en p_5 tot en met p_8) dat ervoor zorgt dat het aantal "enen" in iedere rij en in iedere kolom even is.
Als bijvoorbeeld in de bovenste rij x_1 tot en met x_4 maar één bit "een" is, dan zal het pariteitsbit p_1 ook "een" worden om het aantal "enen" in deze rij even te maken.

Tot slot wordt de matrix aangevuld met het pariteitsbit p_4 dat ervoor zorgt dat het aantal "enen" ook in het pariteitsbit even is.

Decodering in de CD-speler
In de CD-speler zijn schakelingen aanwezig die in eerste instantie nagaan of het aantal "enen" in de pariteitsbytes even is. Is dat niet het geval, dan zit er een fout in het pariteitsbyte zélf en kan de foutcorrectie niet worden toegepast. Is het aantal "enen" wel even, dan is het pariteitsbyte betrouwbaar en kan de decodering de matrix samenstellen en controleren of er in iedere rij en in iedere kolom een even aantal "enen" ontvangen is.

Is dat het geval, dan wordt het byte goed verklaard.

Is dat echter niet het geval, dan kan de logica op een vrij eenvoudige manier vaststellen welk bit verkeerd is uitgelezen. Stel bijvoorbeeld, zoals getekend in figuur 5/7.3-3, dat in de tweede rij en in de tweede kolom een oneven aantal "enen" wordt vastgesteld. De elektronica weet dan met stelligheid te melden dat bit x_6 foutief is uitgelezen van het oppervlak van de CD. Dit bit kan hersteld worden en de fout is gecorrigeerd!

Opmerking
Het zal duidelijk zijn dat de beschreven foutcorrectie niet voor 100 % betrouwbaar is. Er zouden immers twee of meerdere bits foutief kunnen zijn uitgelezen, waardoor de controle van het even aantal "enen" toch klopt. Vandaar dat er twee pariteitscontroles worden uitgevoerd. De Q-PARITY wordt uitgevoerd voordat de audiosymbolen aan de hand van de CIRC-modulatie door elkaar zijn gehusseld. Nadien wordt er nog eens een tweede identieke controle ingebouwd door middel van de P-PARITY bytes.

De CIRC-modulatie

Inleiding
Het systeem met de PARITY-bytes werkt prima zolang er maar enkele bits uit een byte verkeerd overkomen. De nokken op de plaat zijn echter zo klein dat het voor de hand ligt dat er een heleboel opeenvolgende nokjes onbruikbaar zijn als er iets met de plaat mis is. Dan worden volledige bytes of zelfs volledige frames foutief uitgelezen en tegen dergelijke codebescha-

digingen is het PARITY-systeem niet opgewassen.

De meest voor de hand liggende oplossing voor dit probleem is uiteraard de nokjes veel en veel langer te maken, zodat een stofje of een krasje niet meer dan een nok verminkt.
Deze oplossing is praktisch volstrekt onbruikbaar omdat de speelduur van de compact disk daardoor onpraktisch kort zou worden.

De Heren Reed en Solomon
Twee statistici, verbonden aan de researchafdeling van Sony, bedachten een oplossing voor dit dilemma.
De kans dat hele 16-bit audio bytes of hele audio-rasters foutief worden uitgelezen wordt minder groot als de informatie in deze bytes of rasters over een langere lengte van de informatiespiraal worden verspreid.
Als dat niet kan door de individuele bits langer te maken, dan moet het maar gebeuren door de audio-informatie van verschillende frames door elkaar te husselen waardoor de informatie van één audiosymbool in twee frames wordt opgenomen, die wel honderd frame-afstanden uit elkaar liggen.

De CIRC
De twee genoemde wiskundigen hebben een procédé ontwikkeld waarbij een zo gunstig mogelijk compromis wordt bereikt tussen enerzijds de noodzakelijke decodeerelektronica in de CD-speler en anderzijds een maximale kans op herstel van fouten in de code.

Het systeem aan de codeerzijde, dus in de studio, is schematisch voorgesteld in figuur 5/7.3-4.

De 4 x 6 audio-symbolen en de vier Q-PARITY bytes worden door vertragingsschakelingen gestuurd. Deze zijn schematisch voorgesteld door de grote driehoek. Ieder byte krijgt een andere vertragingstijd.

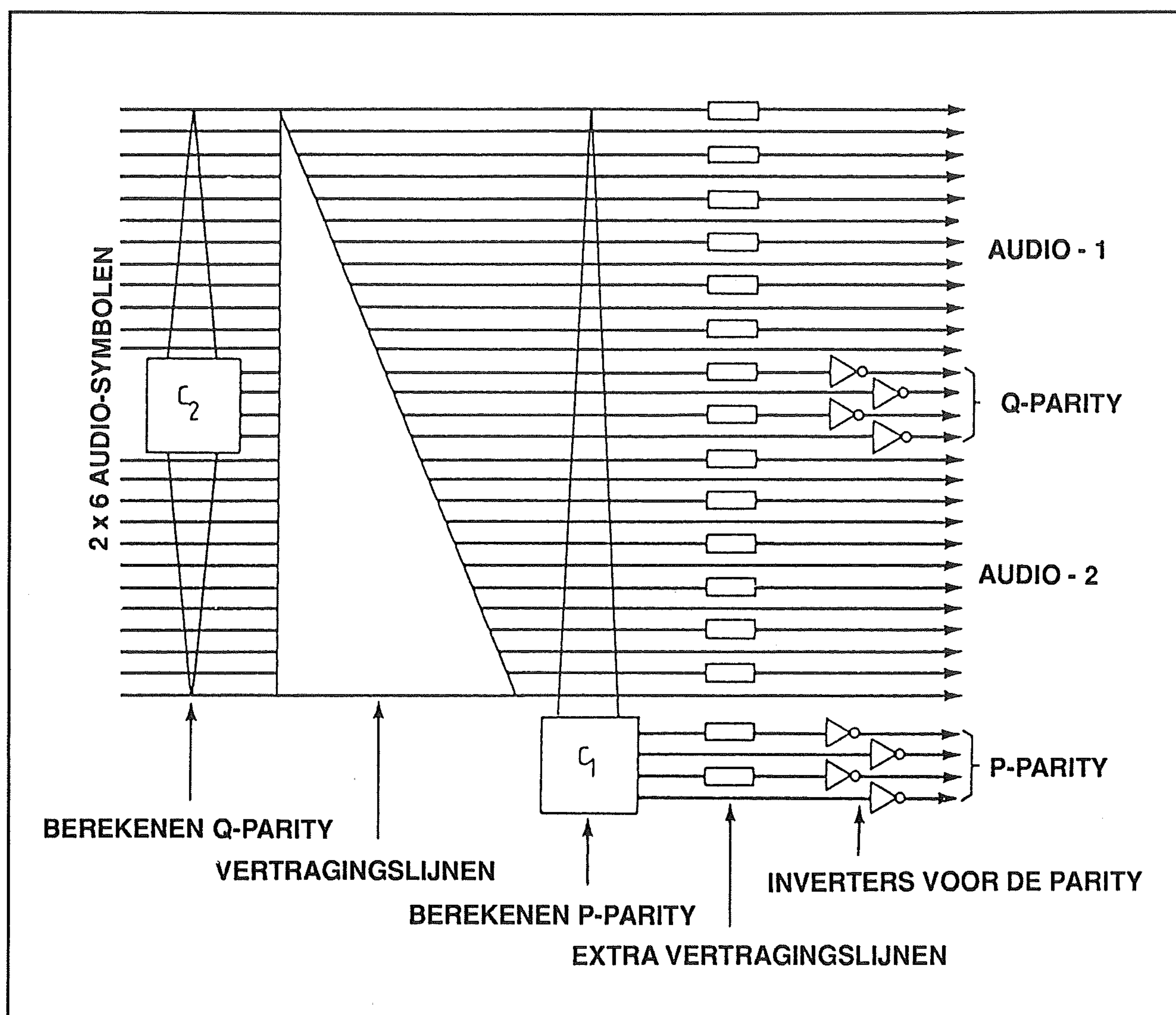
Bij analoge werking van het systeem zou dit op onoverkomelijke technische problemen stuiten. Omdat het CD-systeem digitaal werkt is dit geen enkel probleem. Het volstaat immers alle bytes aan seriële schuifregisters aan te bieden, die ieder uit een bepaald aantal cellen bestaan. Alle registers worden met de systeemklok gestuurd. Als een register uit 8 cellen bestaat zal het byte dat aan de ingang wordt aangelegd 8 klokperioden later op de uitgang verschijnen. Er ontstaat dus een vertraging over 8 perioden.

Het gevolg is dat op de uitgangen van de schuifregister weliswaar 4 x 6 audiosymbolen en 4 Q-PARITY bytes worden terug gevonden, maar dat deze niet allemaal afkomstig zijn van hetzelfde frame. Terwijl de bovenste audio-symbolen de vertragingslijn alweer verlaten hebben zitten de onderste symbolen nog ergens in hun schuifregisters. Op de uitgangen van deze lange registers staan de audio-symbolen van de vorige frames.

In totaal wordt 27 schuifregisters gebruikt, die de opeenvolgende bytes telkens 4 frame-tijden langer vertragen. In totaal wordt dus een vertraging over 108 frames toegepast!

Op de door elkaar gehusselde bytes wordt in een volgende fase een tweede pariteitscontrole C_1 toegepast. De vier berekende P-PARITY bytes worden achter de laatste serie audio-gegevens gekoppeld.

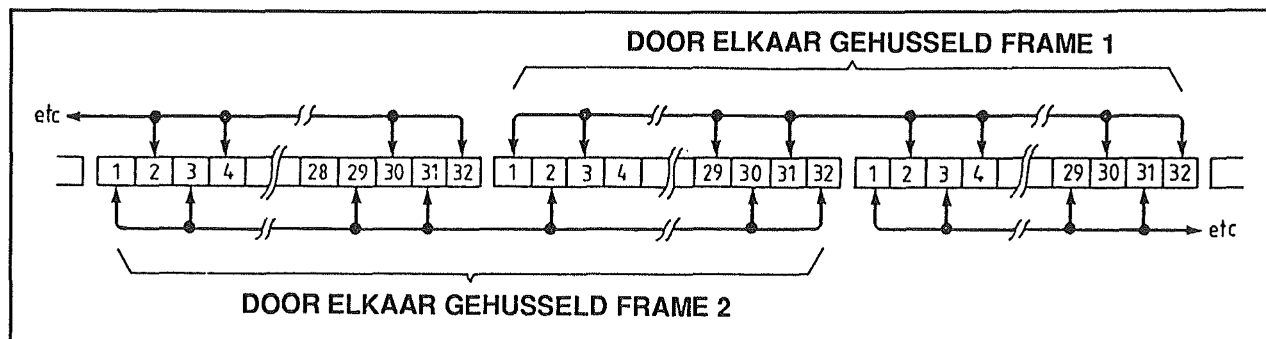
7.3 De codering van het audio-signaal



Figuur 5/7.3-4: Het CIRC-procédé schematisch toegelicht.

Vervolgens worden de oneven bytes nog eens allemaal vertraagd door identieke schuifregisters. Het gevolg hiervan is getekend in figuur 5/7.3-5.
De bytes van één door elkaar gehusseld raster worden in twee opeenvolgend frames op de compact disk ondergebracht. Het gevolg is dat kleine beschadigingen op de compact disk nooit een volledig frame kunnen aantasten.

De Q- en P-PARITY bytes worden geïnverteerd. Deze invertering is noodzakelijk om er zeker van te zijn dat niet alle 32 bytes uit een frame "nul" worden.
Als immers alle audio-bytes "nul" zijn zullen ook alle PARITY-bits "nul" zijn. Als deze situatie lange tijd zou blijven bestaan, dan zouden er verschillende frames met allemaal "nullen" achter elkaar op het spoor geschreven worden.
Dit zou de synchronisatie in de CD-speler, dus het terug winnen van de klokfrequentie waarmee de gegevens op de plaat werden geschreven in gevaar kunnen brengen.



Figuur 5/7.3-5: De gevolgen op de codesamenstelling door het invoeren van de even/oneven vertraging.

Samenvatting
De Cross Interleaved Reed-Solomon Code (CIRC) werkt op twee manieren in de hand dat fouten in de uitgelezen code zo min mogelijk effect hebben op de teruggewonnen gegevens.

- Zeer korte leesfouten:
  De even/oneven vertraging van de bytes, waardoor de gegevens van een door elkaar gehusseld frame in twee opeenvolgende rasters op de CD worden opgenomen is ideaal voor het corrigeren van kleine foutjes in het bitbereik. De C_1 decoder in de CD-speler kan aan de hand van de gegevens in de P-PARITY bytes de foutieve bits snel herkennen en herstellen.

- Lange leesfouten:
  Grotere beschadigingen op de plaat hebben tot gevolg dat meerdere frames op de plaat volstrekt onbruikbaar worden. Er wordt dan gebruik gemaakt van het feit dat de gegevens van één oorspronkelijk raster door elkaar gehusseld verspreid zijn over 108 opeenvolgende frames op de plaat. De decoder in de CD-speler die de oorspronkelijke frames weer samenstelt (dat gaat uiteraard ook weer met vertragingslijnen) zal dus altijd wel wat gegevens van twee opeenvolgende audio-monsters onbeschadigd kunnen terug vinden in die 108 frames. Uit deze informatie en met behulp van de Q-PARITY bytes wordt in eerste instantie gepoogd zoveel mogelijk bytes te herstellen. Lukt dat niet, dan wordt de interpolatietechniek ingeschakeld waarbij de ontbrekende gegevens worden berekend door het gemiddelde te nemen van het vorige en volgende monster.

Herstelcapaciteit van het CIRC-procédé
Met het CIRC-procédé is het mogelijk aan de hand van de pariteitscontrole fouten tot 4000 bit te herstellen. Dat komt overeen met een spoorlengte op de CD van ongeveer 2,5 mm.
Door het inschakelen van de interpolatietechniek is het zelfs mogelijk te corrigeren over 12.000 bit, het equivalent van ongeveer 7,5 mm spoorlengte! Uiteraard werkt de interpolatie niet vervormingsvrij, vandaar dat (zie eerste hoofdstuk) de "MUTE" wordt ingeschakeld.

Toevoegen Subcode byte

Inleiding
Het subcode byte wordt ook het C&D-byte genoemd, afkorting van "Control and Dis-

play". Over dit byte zou een heel eigen hoofdstuk geschreven kunnen worden!

Dat de ontwerpers van het CD-systeem wel heel ver in de toekomst hebben gekeken volgt uit het feit dat het, dank zij de gegevens die in deze bytes worden opgenomen, mogelijk is compact disk spelers te ontwerpen die zijn uitgerust met een alfanumeriek LCD-display.
Tijdens het spelen van een muziekstuk zou op dit display informatie kunnen verschijnen over de levensloop van de componist en over de ontstaansgeschiedenis van de muziek.

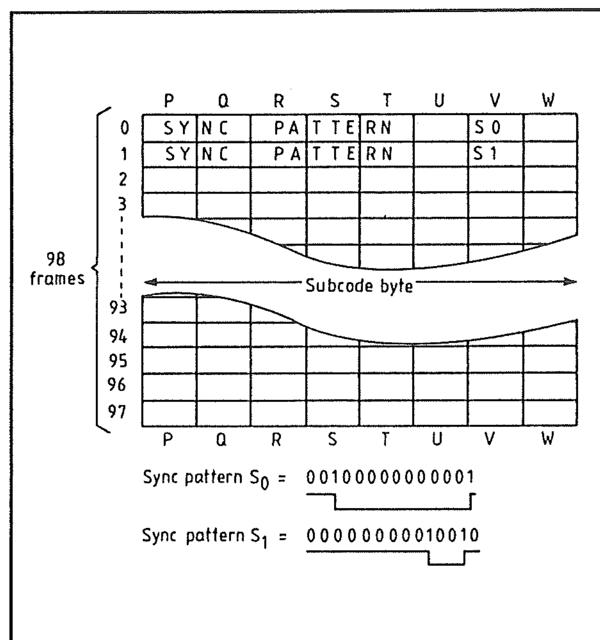
Al deze gegevens kunnen gemakkelijk in dat ene byte per frame geschreven worden. Vergeet niet dat er 7350 frames per seconde worden geschreven zodat er ook 7350 C&D-bytes per seconde worden uitgelezen!

De C&D-bytes staan niet op zichzelf, maar worden verzameld in zogenaamde subcode datablokken. Ieder datablok bestaat uit 98 C&D-bytes, verzameld uit 98 opeenvolgende frames. In totaal worden er dus 7350 gedeeld door 98 is gelijk aan 75 datablokken per seconde uitgelezen.

De samenstelling van de datablokken
De samenstelling van de datablokken is getekend in figuur 5/7.3-6.

De bytes worden ingelezen in een matrix, opgebouwd uit 8 kolommen en 98 rijen.

De twee eerste rijen, dus de twee eerste bytes van het blok, bevatten synchronisatiepulsen S_0 en S_1. Deze hebben een unieke samenstelling, zodat de elektronica in de CD-speler deze bytes gemakkelijk kan identificeren.

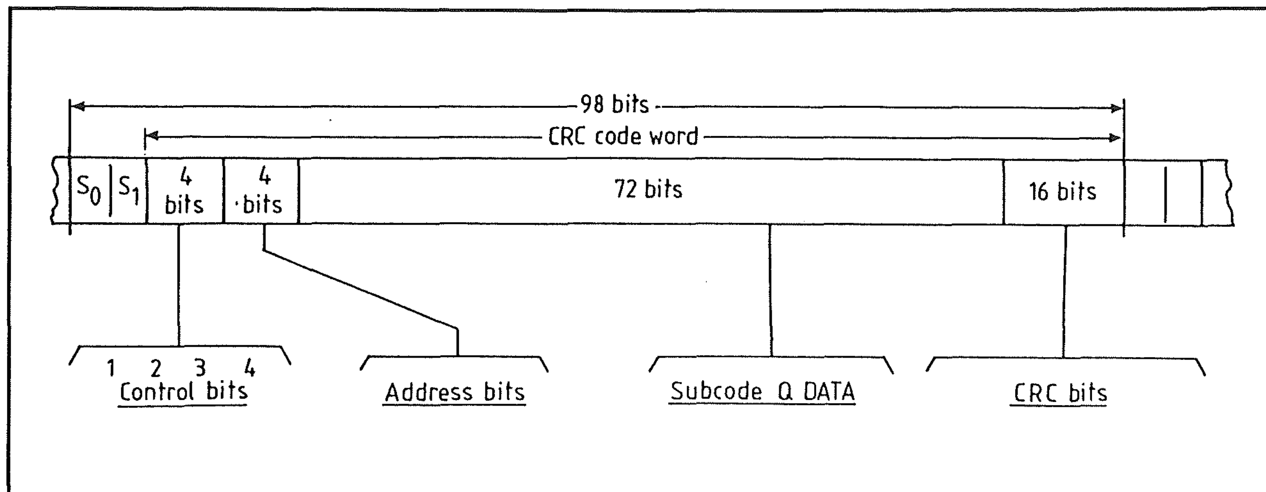


Figuur 5/7.3-6: De samenstelling van een subcode datablok uit 98 C&D-bytes.

De overige gegevens worden per rij uitgelezen. Een datablok bevat dus acht woorden, die ieder uit 96 bit bestaan. De woorden worden gekenmerkt door lettercodes, namelijk P, Q, R, S, T, U, V en W. Op dit moment zijn alleen de woorden P en Q in de CD-standaard die tussen Philips en Sony is afgesproken gedefinieerd.

De betekenis van het P-woord
Het P-woord bevat gegevens waaruit de CD-speler kan afleiden dat er een nieuw muzieknummer wordt gestart of dat er een nieuwe passage uit een klassiek stuk aan de beurt komt.
Deze zogenaamde "startflag" bestaat uit het gedurende twee seconden uitzenden van P-woorden die volledig gevuld zijn met "enen". De microprocessor in de CD-speler kan zeer snel van de ene naar de andere startflag overschakelen. Dank zij de lange duur van deze flag moeten niet alle windingen van de informatiespiraal afgetast worden.

7.3 De codering van het audio-signaal



Figuur 5/7.3-7: De samenstelling van het Q-woord uit het datablok van de subcode.

De optische pick-up kan dus snel heen en weer over het oppervlak worden bewogen omdat de startflag vele windingen lang is.

Een tweede functie van het P-woord is het informeren van de elektronica dat de plaat is afgelopen. In de laatste windingen van de spiraal wordt het P-woord met een frequentie van 2 Hz gemoduleerd met enen en nullen. De microprocessor in de speler herkent deze code en treft de noodzakelijke maatregelen om het aftasten van de plaat te beëindigen, om de CD opnieuw af te spelen als de "REPLAY"-functie is gekozen of om in CD-wisselaars de volgende CD op de draaitafel te leggen.

De betekenis van het Q-woord
De samenstelling van dit woord is getekend in figuur 5/7.3-7.

De eerste twee bits maken uiteraard deel uit van de synchronisatiebits S_0 en S_1 en hebben geen betekenis voor de samenstelling van het woord.

Nadien volgen vier groepen bits, die de volgende betekenis hebben.

BIT 1	BIT 2	BIT 3	BIT 4	BETEKENIS
0				CD IS STEREOFONISCH
1				CD IS QUADROFONISCH
	X			BIT NIET GEDEFINIEERD
		0		COPIEREN TOEGESTAAN
		1		COPIEREN VERBODEN
			0	GEEN PRE-EMPHASIS
			1	WEL PRE-EMPHASIS

BIT 1	BIT 2	BIT 3	BIT 4	BETEKENIS
0	0	0	1	MODE NUMMER 1
0	0	1	0	MODE NUMMER 2
0	0	1	1	MODE NUMMER 3

Figuur 5/7.3-8: De betekenis van de control en adress bits uit het Q-woord van de subcode.

- Control bits:
  Deze vier bits geven informatie over de samenstelling van de compact disk. De betekenis van alle bits is gegeven in de bovenste tabel van figuur 5/7.3-8.
  Hieruit blijkt dat men rekening heeft gehouden met het op de markt komen van vierkanaals systemen, dat de moge-

lijkheid bestaat copieerbeveiligingen in een CD-speler in te bouwen en dat zelfs rekening is gehouden met de uit de plaattechniek bekende emphasis filtertechnieken (verbetering van de weergave van hoge tonen)!

- Adress bits:
  Volgens de codering die gegeven is in de onderste tabel van figuur 5/7.3-8 bepaalt de samenstelling van de vier adress bits de mode van het Q-woord. Deze mode geeft aan wat de inhoud van de 72 Q DATA bits voorstelt.

De betekenis van de modes van het Q-woord
Het zou veel te ver gaan de betekenis van de drie tot nu toe gedefinieerde modes tot in de details te beschrijven. Dus slechts een kort overzicht!

- MODE 1:
  In MODE 1 geven de 72 bit van de Q DATA informatie over de starttijd, de lengte en het nummer van het muziekstuk dat wordt gespeeld.
  Dank zij deze gegevens kan de CD-speler heel erg snel een bepaald nummer selecteren. Bovendien wordt in de Q DATA een timer bijgehouden, die de totale speelduur van de plaat weergeeft.

- MODE 2:
  In MODE 2 geeft de D DATA het zogenaamde "disc catalogue number", een soort ISBN-code voor CD's waaruit onmiddellijk alle gegevens zoals uitgiftedatum, producent en uitvoerenden kunnen worden afgeleid.
  Dit nummer kan in 52 bit worden ondergebracht, zodat er plaats genoeg is in het woord om de timer van MODE 1 te copiëren.

- MODE 3:
  In MODE 3 bevatten de data in de D DATA de zogenaamde "International Standard Recording Code ISRC". Deze code is samengesteld uit 5 alfanumerieke karakters en 7 numerieke karakters.

De woorden R tot en met W
Zoals gezegd zijn deze nog niet gedefinieerd. Enige voorstellen die in de ontwerperswereld de ronde doen:
- Teksten van songs, die synchroon met de gezongen woorden op een alfanumeriek schermpje zouden verschijnen, eventueel in vertaling.
- Eenvoudige kleureneffecten en lijntekeningen op een soort schermpje, als begeleiding van de muziek.
- Stilstaande videobeelden die om de zoveel seconden ververst zouden kunnen worden.

EFM

Inleiding
Zoals reeds opgemerkt in het vorige hoofdstuk (zie figuur 5/7.2-7) levert de optische pick-up geen signaal af met een constante amplitude. De grootte van het signaal is afhankelijk van de lengte van de nokken. Korte nokken leveren een klein signaal, bij lange nokken wordt het signaal groter. Bovendien zal het signaal, afhankelijk van de samenstelling van de digitale code, een beetje op een neer zwalken rond de nul. Er wordt dus een kleine gelijkspanning op gesuperponeerd waardoor het spanningsniveau dat eenduidig voor een "een" of een "nul" staat van een heleboel toevallige omstandigheden afhankelijk wordt.

7.3 De codering van het audio-signaal

Dat heeft tot gevolg dat het onmogelijk is de digitale waarde (het "een" of "nul" zijn) van het signaal af te leiden van de amplitude.
De enige duidelijk aanwezige grootheid is de overgang tussen een nok en een dam, in het signaal aanwezig onder de vorm van een voor- of een achterflank. Hoewel deze flanken natuurlijk ook niet allemaal even groot zijn is het elektronisch niet zo moeilijk een schakeling te verzinnen die de overgangen van het ene naar het andere niveau kan detecteren.

Vandaar dat men heeft besloten de tikken, dus de overgangen tussen nokken en dammen en tussen dammen en nokken de digitale waarde "een" te geven en zowel de nokken als de dammen gelijk te stellen aan digitaal "nul".

Verhogen van de klokfrequentie

De geschetste toekenning van digitale "enen" aan de tikken heeft een onverwacht bijkomend voordeel.
Een tik is veel smaller dan een nok. Een digitale "een" moet dus niet langer voorgesteld worden door een nok met een minimale lengte van 0,8 μm maar kan veel korter zijn! Daar heeft men dankbaar gebruik van gemaakt en men heeft de klokfrequentie waarmee het signaal op de plaat wordt geschreven verhoogd tot 4,3218 MHz.
Zoals bekend levert de ADC per seconde: 2 x 16 x 44.100 = 1.411.200 bit.
De frequentie van de audio datastroom is dus gelijk aan 1,4112 MHz.
De klokfrequentie kan bijgevolg een factor drie verhoogd worden, waaruit men zou kunnen besluiten dat er drie keer zoveel informatie op een compact disk past. Dat dit echter niet het geval is zal dadelijk blijken.

Acht bit code te klein

De 32 bytes uit een raster bestaan allemaal uit 8 bit. Alle 256 mogelijke codecombinaties kunnen voorkomen. Er zullen dus tal van bytes bestaan waar twee of meerdere opeenvolgende bits "een" zijn. Als men echter besluit "enen" voor te stellen door tikken, dan kan men alleen maar gebruik maken van de hogere klokfrequentie als er geen twee "enen" achter elkaar voorkomen. Zo'n twee opeenvolgende "enen" moeten immers voorgesteld worden door twee tikken, dus door een dam/nok/dam overgang. Een bit komt dan toch weer overeen met een schrijflengte van 0,8 μm en het voordeel van de zeer kleine ruimte (een tik) die nodig is voor het schrijven van een "een" en de daaruit volgende hogere maximale klokfrequentie gaat weer verloren.

Van acht naar veertien

Men heeft dit probleem op een zeer handige, zij het omslachtige manier opgelost. Men heeft een nieuwe code bedacht, waarin nooit twee "enen" achter elkaar voorkomen. Bovendien mogen in deze code nooit minder dan twee "nullen" achter elkaar optreden en mogen er ook nooit meer dan tien "nullen" achter elkaar aanwezig zijn.
Twee "enen" worden dus minstens gescheiden door twee "nullen", zodat de sequentie "een/nul/nul/een" voorgesteld kan worden door één nok met de minimale breedte van 0,8 μm. Deze code kan dus zonder bezwaar met 4,3218 MHz op de plaat geschreven worden.

De limiet van maximaal 10 "nullen" achter elkaar wordt bepaald door de synchronisatiegrens in de CD-speler. De "enen" worden immers mede gebruikt voor het afstemmen van de speleroscillator op de

plaatklok en als er te lang geen "een" verschijnt zou deze schakeling uit synchronisatie kunnen komen.

Blijft de vraag uit hoeveel bits deze nieuwe code moet bestaan. Met de computer heeft men berekend dat uit de 16.384 codecombinaties die een veertien bit woord kan bevatten er 267 aan de gestelde drie eisen voldoen. Daar passen de 256 acht bit codes die in een byte kunnen voorkomen mooi in!

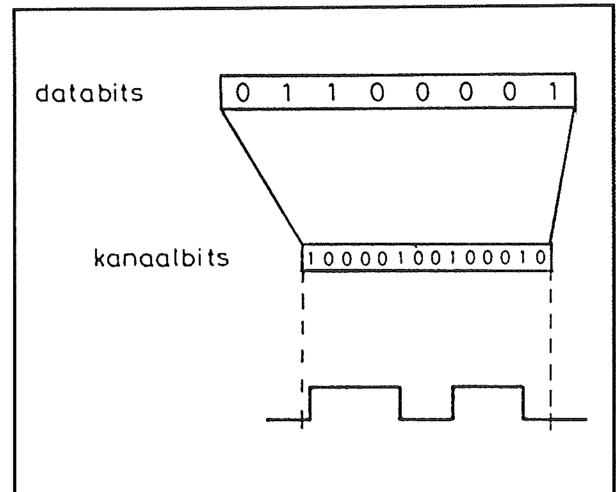
De "normale" acht bit bytes worden dus omgezet in bepaalde veertien bit lange CD-bytes. Voor deze omzetting is uiteraard een gestandaardiseerde codetabel ontworpen, zodat in alle studio's waar audio-informatie wordt omgezet in CD-codering met dezelfde codeconversie wordt gewerkt.

Het zal nu wel duidelijk zijn waarom men deze stap in de codering "EFM" noemt. Dat is de afkorting van "Eight to Fourteen Modulation".

In figuur 5/7.3-9 is het verband gegeven tussen een "normaal" byte, het CD-byte en het patroon van nokken en dammen dat op de plaat wordt geschreven.

De totale winst in gegevensdichtheid door de EFM

Het verhogen van de kloksnelheid met een factor drie heeft geen vergroting van de gegevensdichtheid met dezelfde factor tot gevolg. Men moet immers rekening houden met het vergroten van de lengte van de bytes tot 14 bit. Uit de volgende paragraaf zal zelfs blijken dat er aan deze 14 EFM-bytes nog eens drie bits moeten worden toegevoegd. Een "normaal" byte wordt dus 17 bit lang!



Figuur 5/7.3-9: De samenhang tussen een byte, een CD-byte en het plaatreliëf.

Toch kan men eenvoudig berekenen dat er 3 x 8/17 = 1,41 meer informatie op het oppervlak van een CD kan worden geschreven door de EFM en de daarmee samenhangende verhoging van de klokfrequentie.

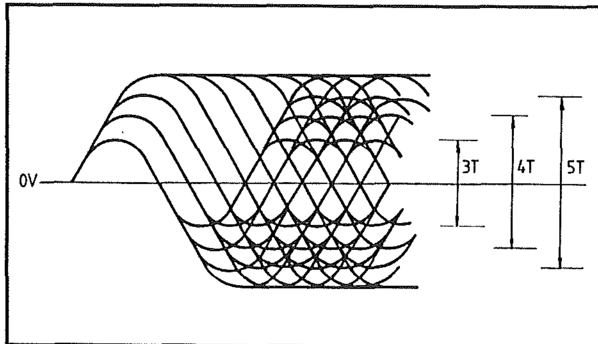
Minimaliseren van de DSV

Inleiding

Zoals reeds gezegd levert de optische pick-up geen mooi signaal af, maar een soort driehoekvormige spanning waarvan de amplitude afhankelijk is van de lengte van de nokken. In figuur 5/7.3-10 is het typische beeld getekend dat op het scherm van een oscilloscoop verschijnt als men de spanning van de fotodioden op de ingang van het apparaat zou aansluiten.

De amplitude is dus sterk afhankelijk van de breedte van de nokken. Omdat het nok/dam patroon op de plaat volkomen willekeurig is zal de amplitude van het herwonnen signaal ook volkomen willekeurig heen en weer schommelen tussen een minimale en een maximale waarde.

7.3 De codering van het audio-signaal



Figuur 5/7.3-10: Het uitgangssignaal van de fotodioden uit de optische pick-up.

Het introduceren van een gelijkspanningsoffset

Het gevolg is dat dit signaal niet symmetrisch ten opzichte van de nul zal zijn. Door de willekeurige opeenvolging van nokken en dammen met bovendien ook nog eens willekeurige lengtes zal de gemiddelde waarde van het signaal de ene seconde iets positief zijn en de volgende seconde iets negatief. Er wordt dus een gelijkspanning op het signaal geïntroduceerd, de zogenaamde offset.
Dat is voorgesteld in de bovenste grafiek van figuur 5/7.3-11.

In dit voorbeeld worden twee CD-bytes uitgelezen die meer laag dan hoog zijn. Het gevolg is dat de gemiddelde gelijkspanningswaarde van het diodesignaal tamelijk negatief wordt.

De gevolgen van de offset

Dat offsetverschijnsel is om diverse redenen zeer ongewenst.

Op de eerste plaats kunnen daardoor timingfouten ontstaan in de schakeling die de uitgangsspanning van de dioden omzet in een mooi digitaal signaal. In deze schakeling wordt de diodespanning namelijk vergeleken met een vast niveau. Omdat de voor- en de achterflanken van het signaal tamelijk vlak verlopen zal het moment waarop de comparator omschakelt in bepaalde mate afhankelijk worden van de gelijkspanningsinhoud van het signaal. Dat is absoluut ongewenst omdat daardoor de verhouding tussen "enen" en "nullen" kan worden vervormd.

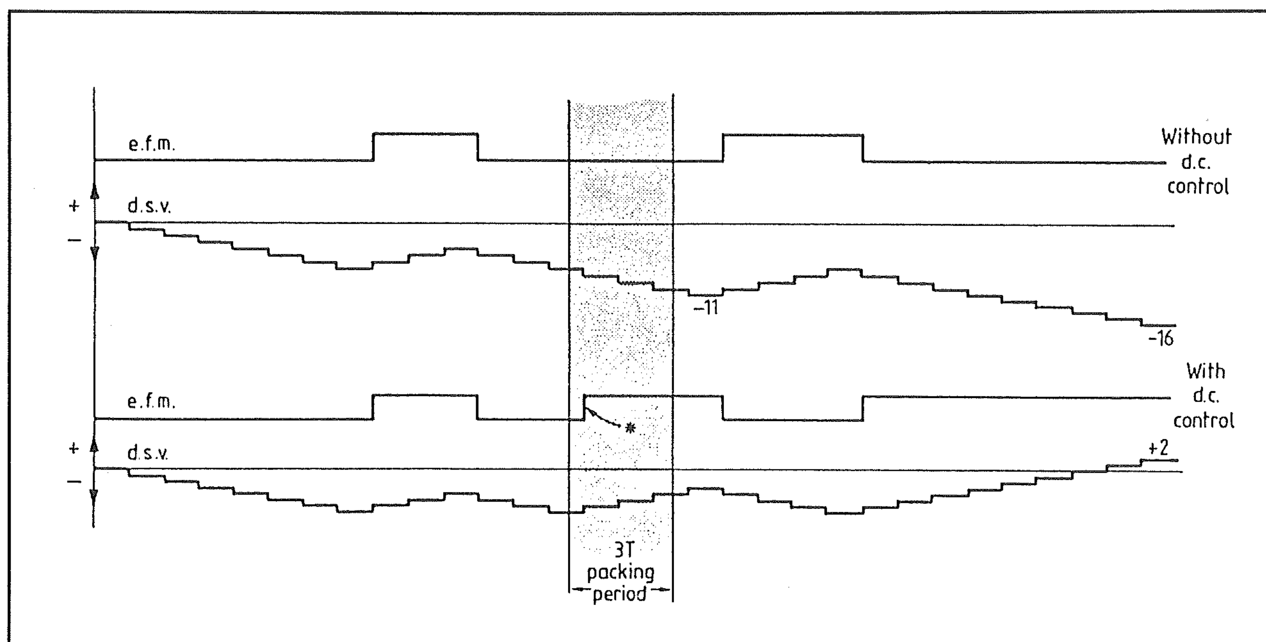
Op de tweede plaats werkt het systeem dat de lichtspot op de winding gericht houdt met zeer laagfrequente signalen die in de uitgangsspanning van de fotodioden verweven zitten. Een variërende offset op de diodespanning, als gevolg van de DSV van de code kan het regelsysteem in verwarring brengen.

De DSV-compensatie

Om deze offset, die een gevolg is van de "Digital Sum Value" van de digitale code zo gering mogelijk te houden worden er drie extra bits aan ieder CD-byte gekoppeld. Dat noemt men de "koppelbits" of de "packing".
Zoals voorgesteld in de onderste grafiek van figuur 5/7.3-11 wordt de inhoud van deze bits zo berekend dat de gemiddelde DSV zo gering mogelijk is. Het gevolg is dat het analoge signaal dat de fotodioden leveren een offset heeft dat de nul zo veel mogelijk benaderd.

In het getekende voorbeeld zorgen deze drie extra bits ervoor dat de polariteit van het tweede raster inverteert. Danmen worden nokken, nokken worden dammen. Omdat dammen en nokken voor logische "nullen" staan heeft dat geen gevolgen voor de samenstelling van de code. Het gevolg van deze invertering is wel dat de gemiddelde waarde van het signaal, die eerst door het uitlezen van het eerste frame tamelijk negatief was geworden, zich nadien weer naar de nul begeeft.

7.3 De codering van het audio-signaal



Figuur 5/7.3-11: Het optreden van een gemiddelde gelijkspanning op het uitgangssignaal van de fotodioden uit de optische pick-up.

De tweede functie van de drie koppelbits
Zoals bekend mogen er nooit twee "enen" achter elkaar voorkomen in de datastroom. Nu zou het echter kunnen zijn dat een CD-byte eindigt op een "een" en het volgende begint met een "een". In dat geval zullen de drie koppelbytes de samenstelling "nul/nul/nul" of "nul/nul/een" krijgen waardoor de twee "enen" door minstens twee "nullen" worden gescheiden. Het derde bit wordt dan gebruikt voor het minimaliseren van de DSV.

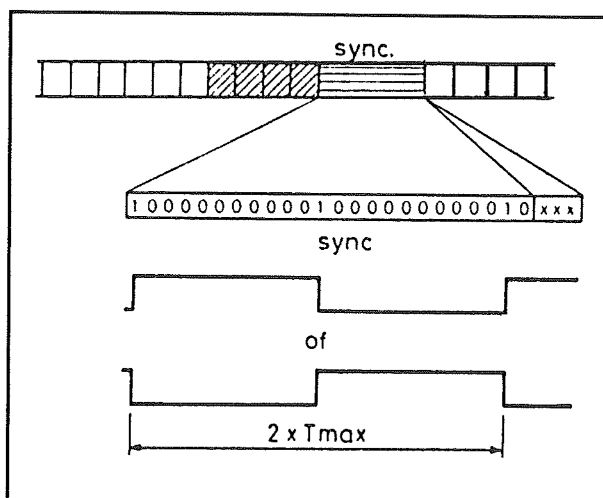
Toevoegen van SYNC-byte

Twee functies
Het SYNC-byte dat de aanvang van een nieuw frame aangeeft heeft twee functies.

Op de eerste plaats weet de microprocessor uit de detectie van het byte dat een nieuw frame start. Op deze manier is de schakeling in staat de subcode te scheiden van de audio-informatie en de na het subcode byte ontvangen gegevens te spitsen in 12 audio bytes, 4 Q-PARITY bytes, weer 12 audio bytes en tot slot 4 P-PARITY bytes. Al deze bytes worden dan op de juiste manier in de schakeling gestuurd die zorgt voor het onthusselen van de code.

Op de tweede plaats wordt de SYNC-puls, de naam zegt het zelf, gebruikt voor het synchroniseren van de locale oscillator met de plaatklok. In feite bevat de plaat alleen duidelijke informatie over de "enen" in de code. Dat zijn de tikken. De "nullen" zijn niet lijfelijk aanwezig en moeten door de schakeling in de CD-speler terug tussen de "enen" worden ingevoegd. Om dit zonder fouten te kunnen doen moet de klokfrequentie waarmee de plaat beschreven is zo nauwkeurig mogelijk worden gereconstrueerd.

7.3 De codering van het audio-signaal



Figuur 5/7.3-12: De samenstelling van het SYNC-byte.

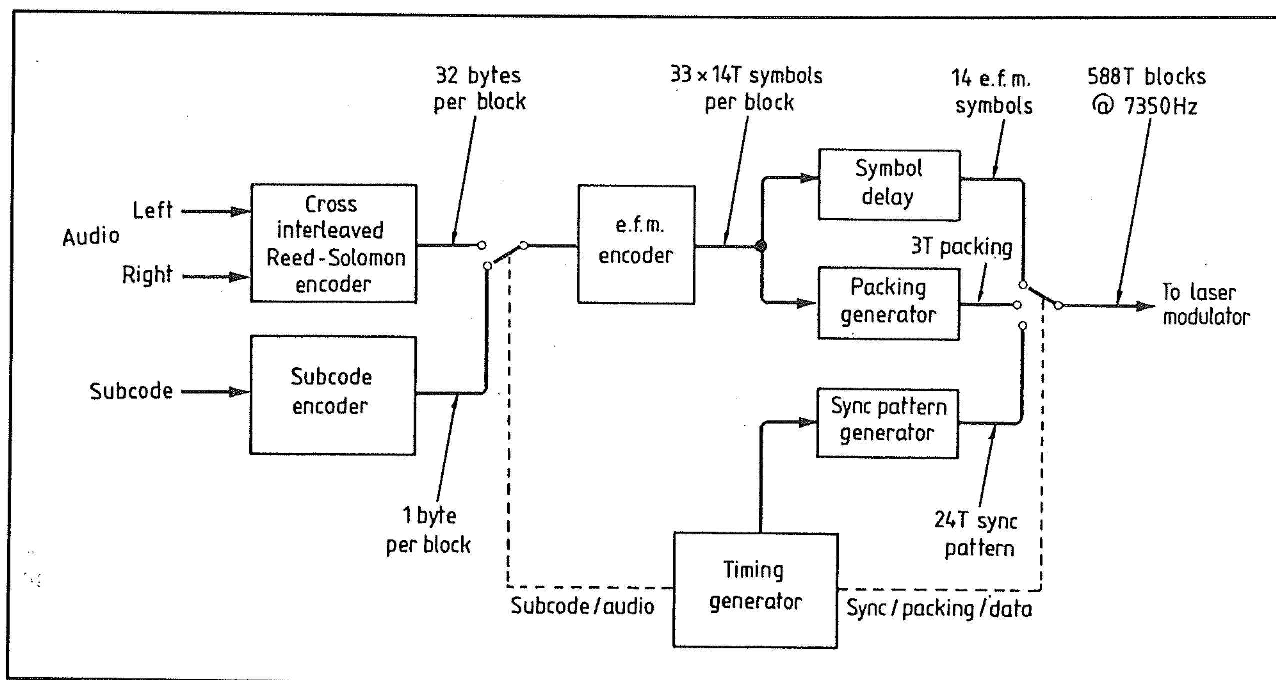
De samenstelling van het SYNC-byte
Dit byte bestaat als enigste byte uit 27 klokperioden. Het is dus onmiddellijk door de elektronica in de CD-speler te herkennen. Zoals uit figuur 5/7.3-12 blijkt is de informatie 14 bit lang. Deze wordt uiteraard aangevuld met de drie DSV-bits.

Omdat dit byte precies 14 klokperioden bevat kan de microprocessor in de CD-speler de juiste frequentie van de plaatklok berekenen en de lokale oscillator door middel van een PLL-schakeling desgewenst corrigeren.

De codeer-elektronica

Tot slot van dit hoofdstuk wordt in figuur 5/7.3-13 een blokschema gegeven van de elektronica die in de studio nodig is om de audio-signalen om te vormen tot de kanaalbitstroom op de plaat.
Het zal na lectuur van dit hoofdstuk wel duidelijk zijn dat dit een heel ingewikkelde schakeling is!

De gedigitaliseerde audio-signalen komen van de twee ADC's, de Subcode van een speciale computer.



Figuur 5/7.3-13: Het blokschema van de codeer-elektronica die in de studio nodig is voor het samenstellen van de kanaalbitstroom.

7.3 De codering van het audio-signaal

De audio-signalen worden eerst in de "Cross Interleaved Reed-Solomon encoder" voorzien van de Q-PARITY bytes, door elkaar gehusseld met de schuifregisters en voorzien van de P-PARITY bytes.
De Subcode wordt in de "Subcode encoder" omgezet in het gestandaardiseerde formaat.

Nadien worden beide datastromen door middel van een elektronische schakelaar op het juiste moment naar de "EFM-encoder" gestuurd. Daar worden de 8 bit via de genormaliseerde codetabel omgezet in de 14 bit code.
Nadien worden de CD-bytes vertraagd over de bytelengte in de "Symbol delay".

Dat is noodzakelijk omdat de "Packing generator" de inhoud van twee CD-bytes moet kennen om de samenstelling van de drie koppelbits te berekenen.

De "Timing generator" levert via de "Sync patern generator" de SYNC-bytes.

Nadien worden de audio- en parity-bytes, de packing en de SYNC door middel van een tweede elektronische schakelaar op de juiste momenten op de uitgangslijn geschakeld. De totale seriële datastroom gaat vervolgens naar de "Laser modulator" waarmee het nok/dam patroon in de fotogevoelige laag van de master wordt aangebracht.

7.3 De codering van het audio-signaal

5/7.4

De optische pick-up

Inleiding

Drie functies
De optische pick-up is zonder enige twijfel het belangrijkste onderdeel van de CD-speler. Het heel ingewikkelde stelsel van laserdiode, lenzen, spiegels, prisma's en foto-dioden heeft namelijk drie belangrijke functies:
- het detecteren van de nokken en dammen in de informatiespiraal en het omzetten van dit patroon in een bruikbaar digitaal signaal;
- de laserstraal die de informatiespiraal aftast precies gericht houden op de windingen van de spiraal;
- het lenzensysteem besturen, zodat de straal precies op de reflecterende laag van de CD-schijf gericht blijft.

Straal-correctie
De twee laatstgenoemde functies zijn zeer belangrijk! Door de zeer geringe afmetingen van het informatiespoor zal zelfs de geringste afwijking in de centrale positie van het centreergat of de geringste hobbel in de schijf tot gevolg hebben dat of de straal tientallen windingen overslaat of de lichtspot volledig uit focus komt.

Diverse systemen
Voor de optische pick-up zijn verschillende systemen ontworpen.

Er zijn op dit moment twee systemen in gebruik.

Philips werkt met een enkelstraal-systeem terwijl de meeste Japanse fabrikanten gebruik maken van een systeem met drie stralen, de zogenaamde "tri-spot" methode. Deze twee systemen zullen in dit hoofdstuk uitvoerig behandeld worden.

Diverse constructies
Daarnaast zijn in de loop der jaren twee constructies ontwikkeld.

Bij de eerste generatie spelers was de gehele optische pick-up loodrecht ten opzichte van de plaat gemonteerd en werd dit geheel draaibaar rond een centrale as onder de plaat bevestigd. De werking van deze zogenaamde "roterende optische pick-up's" is dus in principe te vergelijken met deze van een traditionele arm in een platendraaier. Door de pick-up rond de centrale as te laten draaien kan de lichtstraal het volledige oppervlak van de plaat aftasten.
Een nadeel van deze systemen is dat de pick-up tamelijk diep is en dus niet bruikbaar is in geminiaturiseerde, draagbare CD-spelers.

Vandaar dat men tegenwoordig hoofdzakelijk gebruik maakt van de zogenaamde "slede pick-up's". De laserdiode zendt zijn

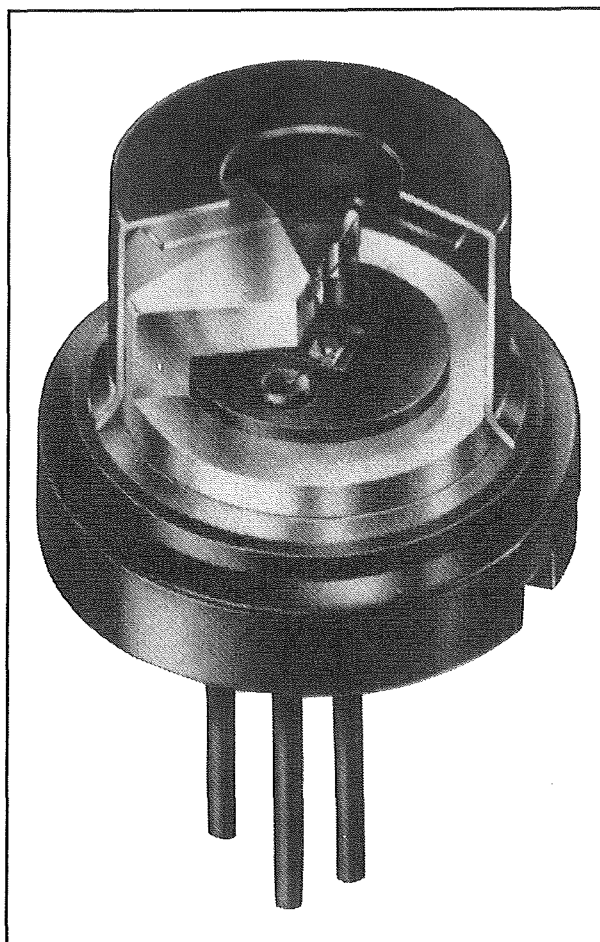
straal in eerste instantie in een vlak uit dat evenwijdig loopt aan de CD.
Nadien wordt deze straal 90 ° afgebogen naar het oppervlak van de plaat, zodat de straal toch loodrecht invalt op het oppervlak.
De optische pick-up wordt radiaal heen en weer bewogen onder de schijf. Deze constructie is dus in principe te vergelijken met een radiale pick-up arm in een traditionele platenspeler.

De laserdiode

Inleiding
Het zal duidelijk zijn dat er al lang geen gasgevulde laserbuizen meer worden toegepast in CD-spelers! Het aftastmedium, de laserstraal, wordt gegenereerd door een halfgeleider laser, de zogenaamde laserdiode.

In figuur 5/7.4-1 is de samenstelling van zo'n diode, in dit geval het type CQL10, getekend.
Deze laserdiode zendt een lichtstraal uit met een golflengte tussen de 780 en de 800 nm.

Groot fundamenteel verschil tussen een gaslaser en een halfgeleiderlaser is dat deze laatste geen gebundelde straal uitzendt.
Typische openingshoek van een laserdiode is 50 ° en vandaar dat de bundelingslens maar een deel van de uitgestraalde energie op de CD kan focusseren. De laserdiode zendt op zich al heel weinig energie uit, 5 mW is voor de meeste typen het maximale uitgangsvermogen.
Van deze 5 mW komt uiteindelijk slechts 0,5 mW op de reflecterende laag terecht!



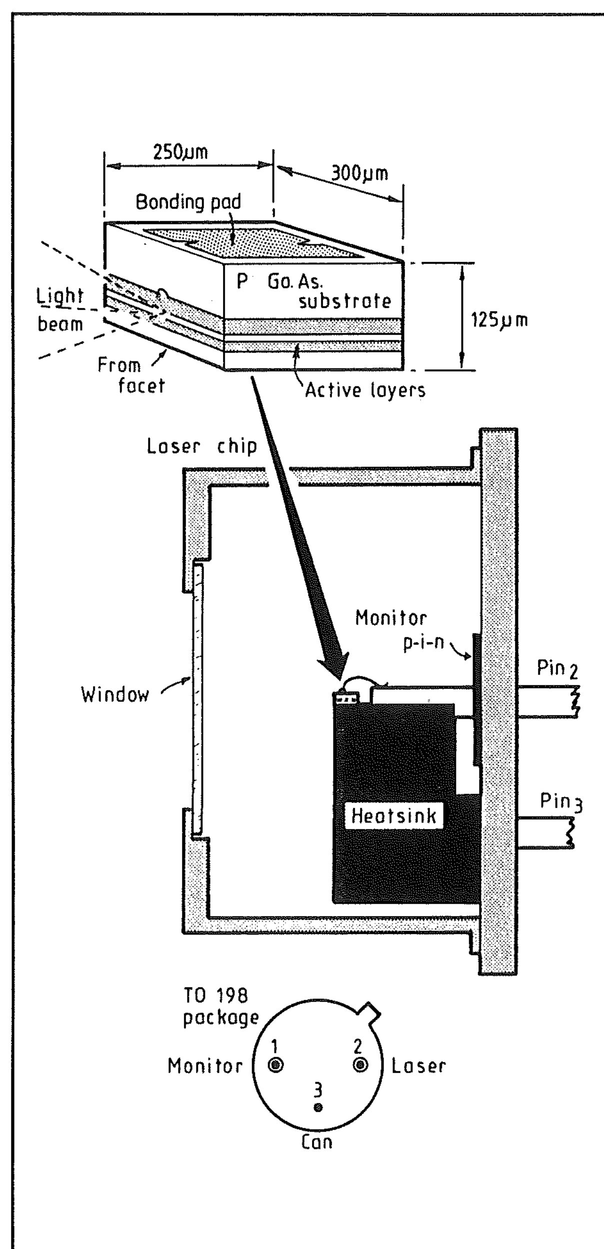
Figuur 5/7.4-1: De samenstelling van de CQL10 diode, die in vele optische pick-up's wordt toegepast als lichtbron.

Nadere beschouwing
Iets dat onmiddellijk opvalt is dat de diode drie aansluitingen heeft, terwijl men zou verwachten dat een laserdiode, net zoals iedere andere diode, het met twee aansluitingen kan stellen.
Bij een nadere beschouwing van de constructie van zo'n onderdeel aan de hand van figuur 5/7.4-2 blijkt echter dat er, naast de eigenlijke laserdiode, ook nog een fotodiode in de behuizing zit.
Deze fotodiode noemt men de monitordiode en in de meeste schema's van CD-spelers wordt deze diode voorgesteld door

7.4 De optische pick-up

de afkorting "MD". De afkorting "LD" staat dan uiteraard voor de eigenlijke laserdiode.

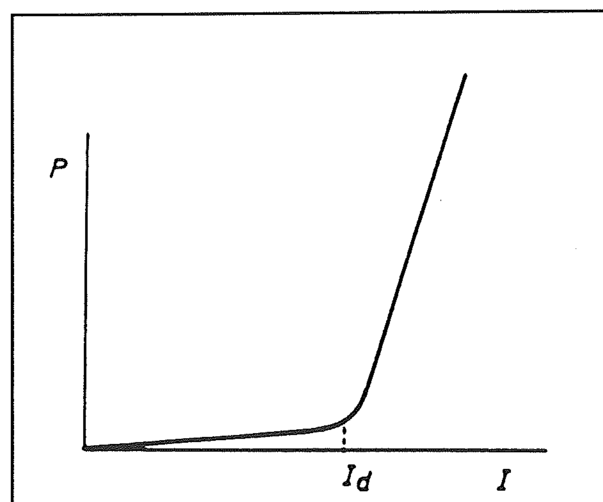
Deze monitordiode is noodzakelijk omdat het sturen van een laserdiode een tamelijk kritische zaak is.



Figuur 5/7.4-2: De samenstelling van een laserdiode.

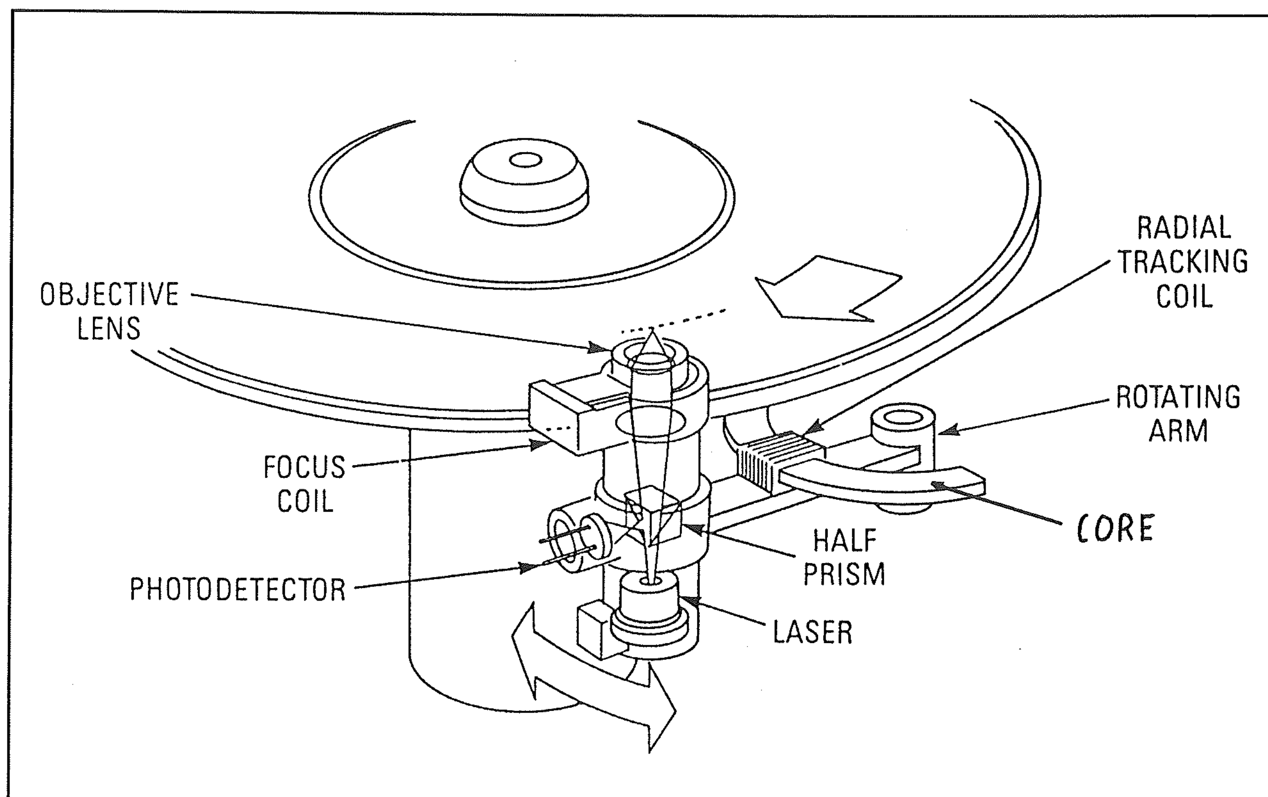
Het eigenlijke fysische laserproces treedt namelijk maar eerst op bij een bepaalde stroom I_d, stroom die erg afhankelijk is van de temperatuur.
Wordt de diode doorlopen door een lagere stroom, dan werkt het onderdeel als een gewone LED en men zal niets meer waarnemen dan een zacht rood schijnsel.

De kritische laserstroom is gemiddeld gelijk aan 50 tot 80 mA en de stuurschakeling die de diode van een constante stroom voorziet moet de stroom steeds zo instellen dat de diodestroom groter is dan de kritische laserstroom I_d, maar anderzijds niet te groot wordt.
Zoals uit de diodekarakteristiek van figuur 5/7.4-3 blijkt, zal namelijk het in de diode opgewekte vermogen zeer snel stijgen als de stroom boven de kritische waarde komt. Een zeer kleine stroomstijging heeft een vertienvoudiging van het vermogen tot gevolg. Zelfs zeer kleine stroomschommelingen kunnen tot gevolg hebben dat de diode wordt vernield.



Figuur 5/7.4-3: Het in de diode opgewekte vermogen neemt sterkt toe nadat de diode is overgeschakeld van LED- naar LASER-bedrijf.

7.4 De optische pick-up



Figuur 5/7.4-4: Constructie en ophanging van een roterende optische pick-up onder de CD-lade van de CD-speler.

Tegengekoppelde sturing

Vandaar dat het noodzakelijk is de stroom die door de laserdiode wordt gestuurd uit een tegengekoppelde stroombron te betrekken.

De monitor-diode stuurt dit teruggekoppeld systeem.
Deze fotodiode vangt een gedeelte van de uitgezonden straling op. De grootte van het uitgangssignaal van deze diode is een maat voor de uitgezonden energie van de laserdiode. Op het moment dat de diode overgaat van LED- naar LASER-bedrijf zal het uitgangssignaal van de diode stijgen.
Op deze manier is men in staat de laserstroom zo te regelen, dat onder alle temperatuursomstandigheden de diode net boven de kritische lasergrens wordt ingesteld.

De roterende optische pick-up

Inleiding

De typische ophanging, constructie en samenstelling van de roterende optische pick-up onder de CD lade is getekend in figuur 5/7.4-4.

De constructie heeft twee zeer belangrijke functies:
- het heen en weer bewegen van de laserstraal voor het volgen van het informatiespoor;
- het op en neer bewegen van de objectieflens voor het focusseren van de straal op het gevoelige oppervlak van de schijf.

7.4 De optische pick-up

Heen en weer bewegen

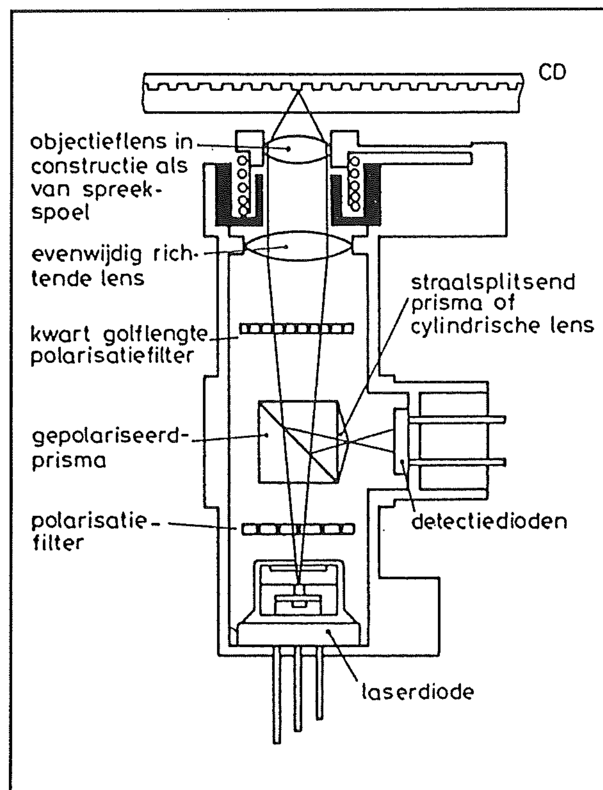
Voor het volgen van de informatiespiraal moet de laserstraal heen en weer kunnen bewegen over de schijf.
De noodzakelijke bewegingen voor het volgen van de spiraal zijn echter zo klein dat zelfs de nauwkeurigste stappenmotor veel te grof werkt. Men werkt dan ook met een elektromagnetisch systeem.

De pick-up is gemonteerd op een arm (Rotating arm) die rond een draaipunt heen en weer kan bewegen. Op de arm is een spoeltje aangebracht (Radial tracking coil) waarin een vast opgestelde weekijzeren gemagnetiseerde kern (Core) aanwezig is.
Het systeem werkt in wezen op dezelfde manier als een elektrodynamische luidspreker. Als er een elektrische stroom door het spoeltje wordt gestuurd zal er rond dit spoeltje een magnetisch veld worden opgewekt waarvan de grootte afhankelijk is van de sterkte van de stroom. Dat magnetisch veld interfereert met het veld van de weekijzeren kern. Het gevolg is dat de kern min of meer in de spoel wordt getrokken. Deze kleine radiale beweging wordt door de as versterkt, zodat de optische pick-up over het gehele informatieoppervlak van de CD-schijf kan bewegen.

Op en neer bewegen

Ook dit systeem werkt elektromagnetisch. De werking wordt toegelicht aan de hand van de doorsnedetekening in figuur 5/7.4-5.

De objectieflens van de pick-up is gemonteerd in een soepele ophanging en voorzien van een kleine spoel (Focus coil). In het chassis van de pick-up is een ronde permanente magneet aangebracht rond deze spoel.



Figuur 5/7.4-5: Doorsnede door een roterende optische pick-up.

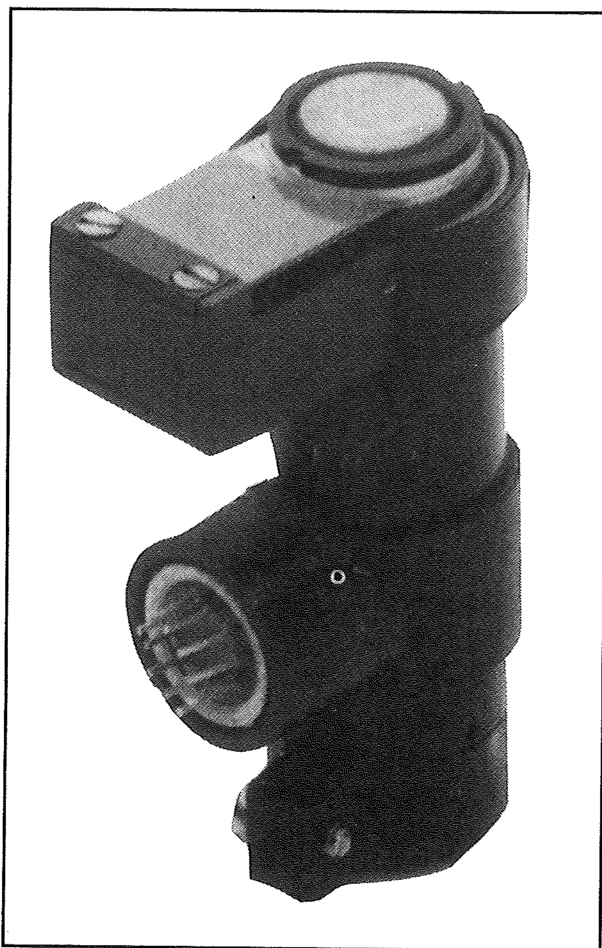
Ook nu zal een stroom door dit spoeltje interactie tussen de twee magnetische velden veroorzaken, zodat de lens op en neer kan bewegen.

Het optische systeem

De laserdiode is in de bodem van de pick-up aangebracht.
De uitgezonden straal gaat eerst door een polarisatiefilter en nadien door een gepolariseerd prisma.
De stralen gaan daar recht doorheen en bereiken het kwart golflengte polarisatiefilter.
De eerste, vast opgestelde lens, bundelt de uitwaaierende straling tot een evenwijdig verlopende bundel.
Tot slot wordt deze bundel door de objectieflens gestuurd. Het later te bespreken

opto-elektronische systeem stuurt de focus-spoel zo, dat de straal op de reflecterende laag van de CD gefocusseerd blijft.

De teruggekaatste stralen worden weer door het kwart golflengte polarisatiefilter gestuurd, zodat er een faseverschuiving van 90 ° ontstaat (een halve golflengte) tussen de uitgezonden en de teruggekaatste straling.
Het gevolg is dat de teruggekaatste straling 90 ° wordt afgebogen in het gepolariseerde prisma. Op deze manier wordt het signaal afgebogen naar de detectiediode den.



Figuur 5/7.4-6: De praktische uitvoering van het systeem.

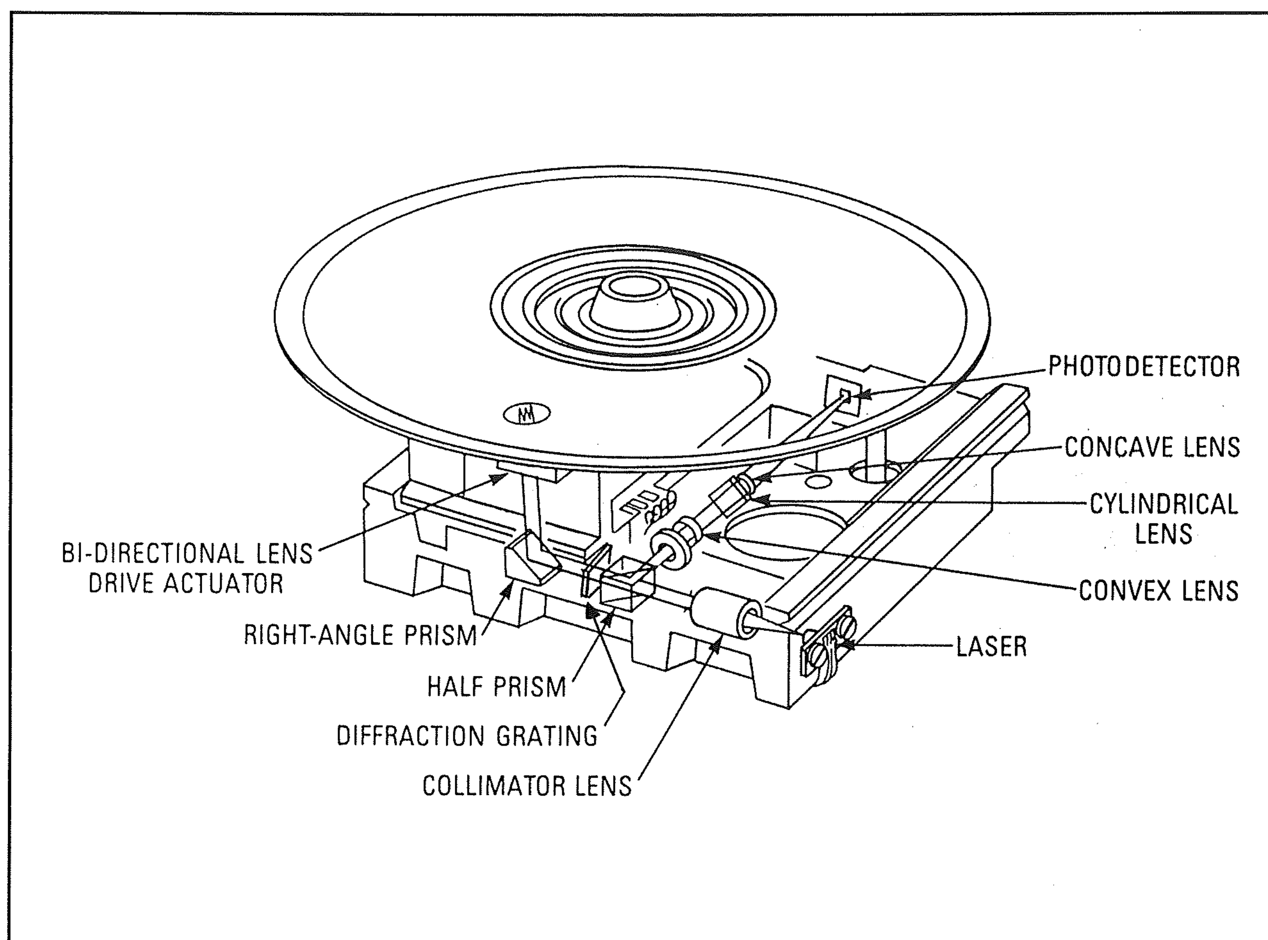
Praktische uitvoering van de pick-up
In figuur 5/7.4-6 is de praktische uitvoering van een roterende optische pick-up gegeven. De besproken onderdelen zijn duidelijk te herkennen!

De slede pick-up

Principiële werking identiek
De twee basisbewegingen, heen en weer en op en neer, worden in principe op dezelfde manier bestuurd.
In figuur 5/7.4-7 is de fundamentele samenstelling van een slede pick-up getekend.
De laser zendt zijn bundel evenwijdig aan de CD uit.
Na het doorlopen van de bundellens (Collimator Lens) wordt de straal aan het gepolariseerde prisma (Half Prism) aangeboden.
De straal doorloopt dit prisma zonder afgebogen te worden.
Nadien doorloopt de straal het polarisatiefilter (Diffraction Grating) en wordt de straal loodrecht naar de CD afgebogen door een tweede, gewoon prisma (Right-angle Prism). De loodrechte straal wordt vervolgens door de bestuurbare objectieflens (Bi-directional lens and Drive Actuator) op de reflecterende laag van de CD gefocusseerd. De teruggekaatste stralen doorlopen het systeem in tegengestelde richting en worden door het half doorlatende prisma naar de foto-detectoren geleid.

Het slede-systeem
De beschreven constructie wordt als een slede heen en weer bewogen. Ook dit gebeurt elektromagnetisch. In figuur 5/7.4-8 is deze constructie geschetst.

7.4 De optische pick-up



Figuur 5/7.4-7: De werking van de slede pick-up.

De slede is uitgerust met twee magnetische weekijzeren kernen (A). Deze kunnen bewegen in de twee vast opgestelde spoelen (B). De slede glijdt heen en weer over de twee geleidingsstaafjes (C) en (D). Door stromen door de spoelen te sturen zal er weer interactie tussen de twee magnetische velden optreden, zodat de volledige slede heen en weer wordt bewogen.

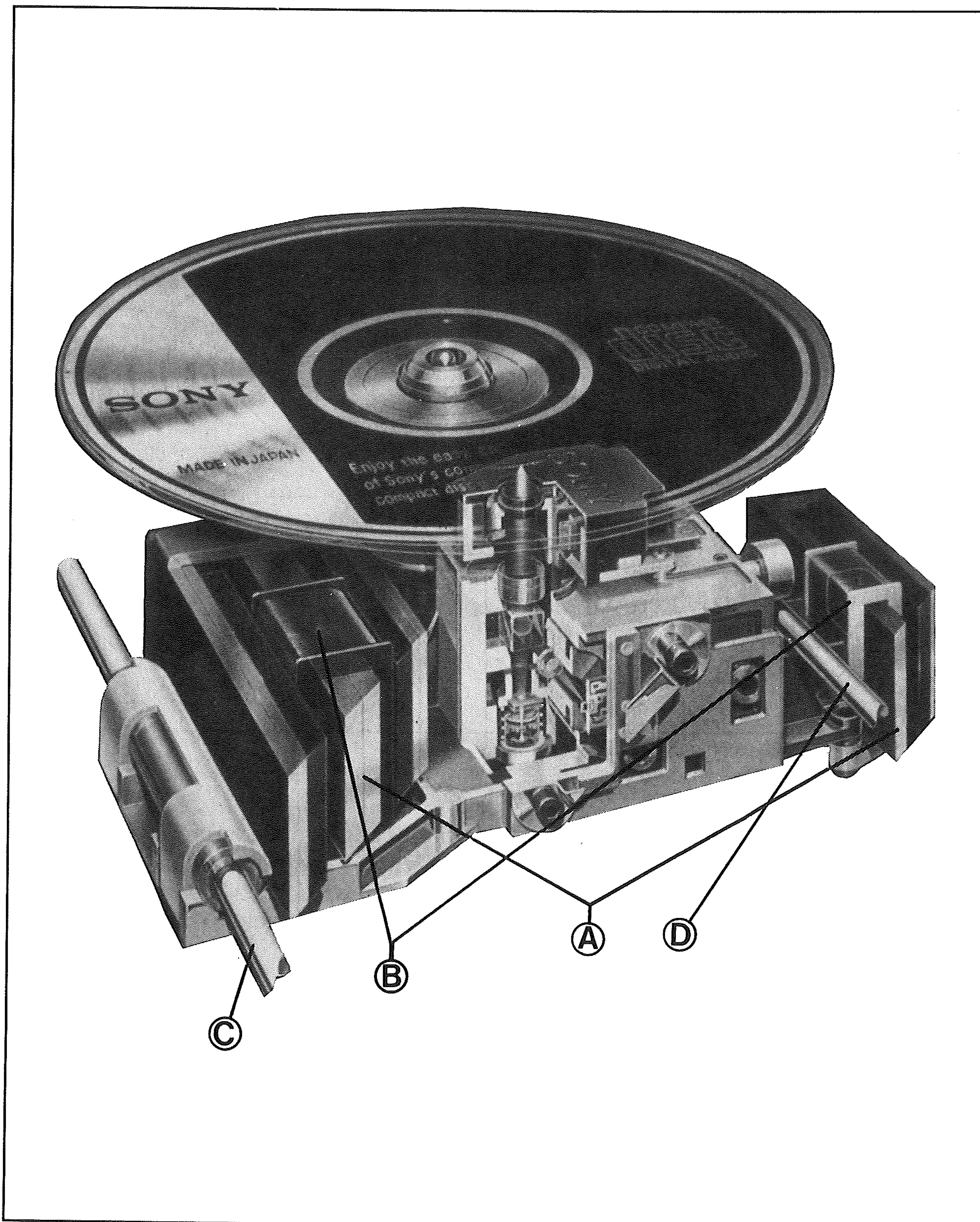
Voordelen van het slede-systeem
Het slede-systeem heeft een inbouwdiepte van slechts 3 cm, terwijl zelfs de kleinste roterende armen toch nog steeds 6 cm hoog waren.

Door de introductie van het slede-systeem konden CD-spelers zeer plat ontworpen worden, een noodzaak voor draagbare apparatuur en CD-spelers voor inbouw in de auto.

Het tri-spot systeem

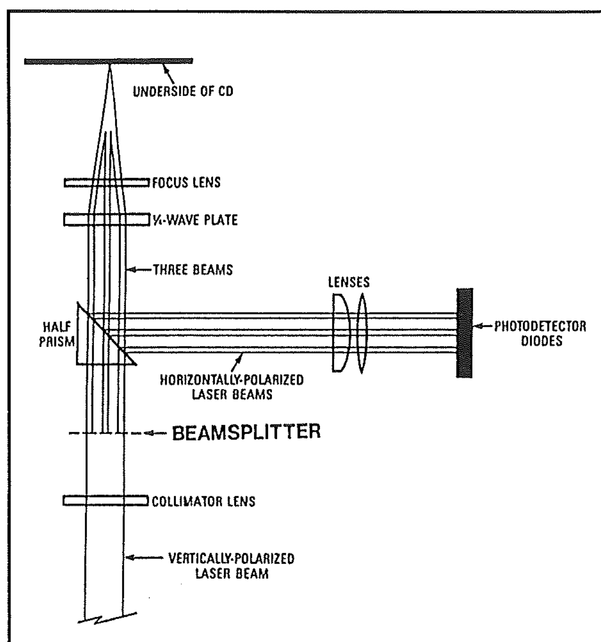
Inleiding
Het tri-spot systeem is het door de japanse fabrikanten ontwikkelde systeem dat de twee basisfuncties van de optische pick-up, het focusseren en richten van de straal op de windingen van de spiraal, uitvoert.

7.4 De optische pick-up

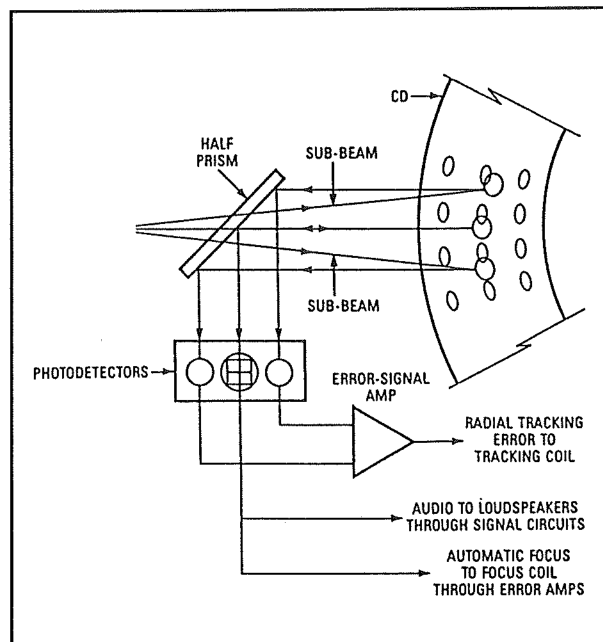


Figuur 5/7.4-8: De constructie van de slede.

7.4 De optische pick-up



Figuur 5/7.4-9: Werking van het tri-spot systeem grafisch toegelicht.



Figuur 5/7.4-10: De functie van de zes fotodioden bij het tri-spot systeem.

De principiële werking van het tri-spot systeem is getekend in figuur 5/7.4-9.

De laserstraal (Laser beam) die door de laserdiode wordt uitgezonden wordt door een speciaal optisch systeem (Beamsplitter) gesplitst in drie stralen. Deze gaan door het half doorlatend prisma en de lens en vallen op het reflecterende oppervlak van de CD-schijf.
Na terugkaatsing en optische bewerking (de beroemde één kwart golflengte polarisator) worden de drie stralen door het prisma onder een hoek van 90 ° afgebogen en op een complex stelsel van fotodioden (Photodetector Diodes) gefocusseerd.

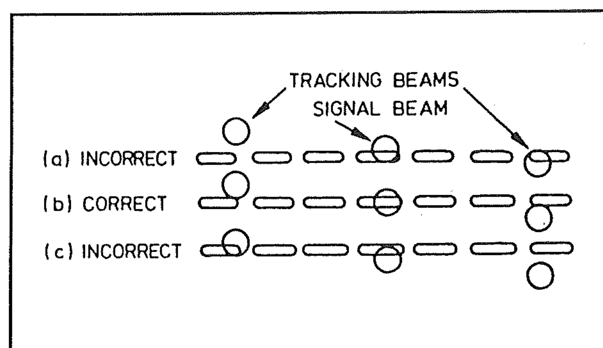
De samenstelling van deze dioden is getekend in figuur 5/7.4-10.

De hoofdstraal (Main beam), verantwoordelijk voor het aftasten van het informatiespoor valt op vier foto-dioden.

De twee overige stralen (Sub-beams) op twee enkelvoudige foto-dioden, links en recht van het kwartet opgesteld.

De ideale spoorvolging
De drie stralen liggen zo ver uit elkaar dat als de hoofdstraal precies op de spiraal staat ingesteld de twee hulpstraaltjes net de putjes niet raken.

Een en ander is getekend in de middelste tekening van figuur 5/7.4-11.



Figuur 5/7.4-11: De werking van de spoorvolging bij het tri-spot systeem.

7.4 De optische pick-up

In dit ideale geval zullen de twee hulpstralen alleen maar reflecteren op het gladde gebied van de schijf rond het informatiespoor. De teruggekaatste stralen hebben een constante intensiteit en wekken in de foto-dioden constante en even grote spanningen op. Deze twee signalen worden aangeboden aan de ingangen van een verschilversterker (Error Signal Amp), zie ook figuur 5/7.4-10.

Deze versterker berekent het verschil tussen de twee even grote signalen en levert dus geen spanning af.

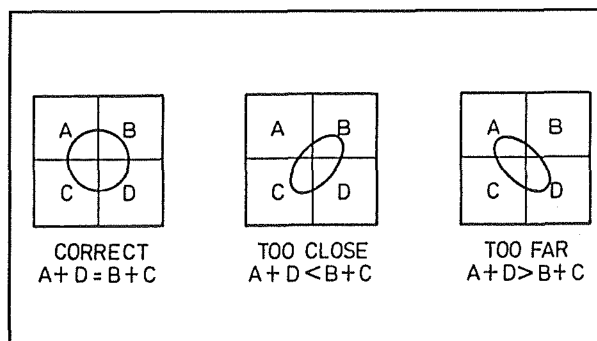
De afwijkende spoorvolging

Als de hoofdstraal niet precies in het midden van het informatiespoor zit zal ofwel de linker ofwel de rechter hulpstraal voor een deel op de nokken vallen. De intensiteit van een van de teruggekaatste hulpstralen wordt daardoor kleiner. De twee foto-dioden leveren nu ongelijke signalen af. De verschilversterker levert een uitgangsspanning af, waarvan de grootte een maat is voor de mate van spoorafwijking en de polariteit een maat voor de richting van de afwijking. Dit signaal stuurt een servo-versterker die een stroom door de Radial tracking coil stuurt. De arm wordt naar links of recht bewogen, tot de verschilversterker weer een nulspanning aflevert.

Het focusseringssysteem

Het focusseringssysteem maakt gebruik van bepaalde optische principes en een zeer gevoelig elektronisch regelsysteem.

Die grote gevoeligheid is zonder meer noodzakelijk. De scherptediepte van het optische systeem is gelijk aan slechts 4 µm. Dat wil zeggen dat de focus-fout maximaal gelijk mag zijn aan 0,5 µm.



Figuur 5/7.4-12: De gereflecteerde hoofdstraal valt in op vier foto-dioden.

Dus moet de afstand tussen de lens van de pick-up en de reflecterende laag binnen deze tolerantie constant blijven.
Zelfs de vlakste schijf zal toch nog altijd een kleine speling hebben waardoor de afstand tussen de lens en de reflecterende laag van de schijf in het gunstigste geval met ongeveer 500 µm varieert als de schijf roteert.

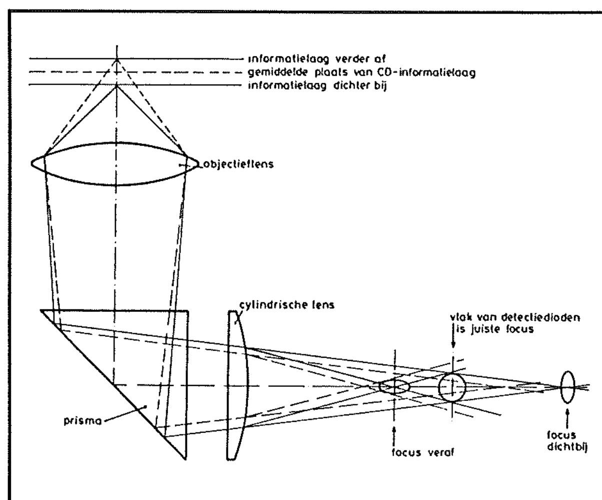
Vier foto-dioden

Zoals reeds gezegd valt de gereflecteerde hoofdstraal in op een diode-kwartet.
Dat is in detail getekend in figuur 5/7.4-12.

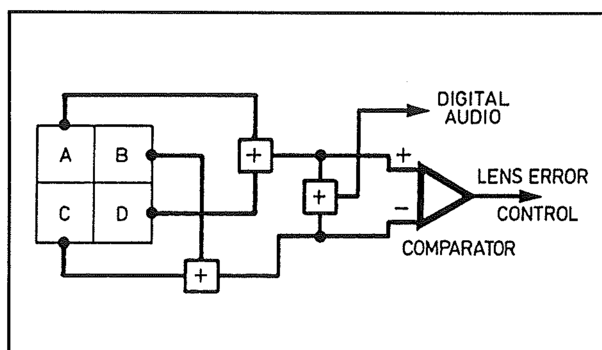
Als het optische systeem goed gefocusseerd is zal de gereflecteerde straal rond zijn. Alle vier de dioden worden in gelijke mate belicht.

Als echter het systeem uit focus geraakt, doordat de afstand tussen lens en CD-schijf iets groter of kleiner wordt, dan zal de gereflecteerde straal dank zij de eigenschappen van de astigmatische lens ellipsvormig worden. Afhankelijk van de richting van de afwijking zal ofwel de diagonaal C/B ofwel de diagonaal A/D meer belicht worden.
Dit optische verschijnsel wordt toegelicht in figuur 5/7.4-13.

7.4 De optische pick-up



Figuur 5/7.4-13: De optische werking van de focussering bij het tri-stop systeem.



Figuur 5/7.4-14: Het elektronische systeem dat de focus-correctie stuurt.

Regelsysteem

Het elektronische regelsysteem is getekend in figuur 5/7.4-14.

De uitgangsspanningen van de dioden A/D en B/C worden opgeteld, de twee somsignalen worden vervolgens aan een verschilversterker aangeboden. Als alle dioden even veel belicht worden (systeem in focus) zullen beide somsignalen even groot zijn en levert de verschilversterker geen signaal af. Als echter A/D of B/C meer belicht worden is een van de somsignalen groter.

De verschilversterker levert een verschilspanning af, waarmee een versterker wordt gestuurd die een correctiestroom door de "Focus coil" stuurt. De afstand tussen lens en reflecterende laag wordt gecorrigeerd, zodat het optische systeem zichzelf weer op het informatiespoor scherp stelt.

Het single-spot systeem

Inleiding

Het tri-spot systeem heeft een aantal nadelen.

- Op de eerste plaats is men verplicht een slede-systeem toe te passen, omdat dit systeem alleen goed werkt als de straal echt radiaal de plaat aftast. Sledesystemen zijn ingewikkelder van constructie en in goedkope CD-spelers voor huisgebruik, waar kleine afmetingen een ondergeschikte rol spelen, zal men bij voorkeur een roterende constructie gebruiken.
- Op de tweede plaats is het optische systeem uiteraard veel ingewikkelder.
- Op de derde plaats heeft men zes fotodioden nodig, onderdelen die vrij duur zijn.
- Op de vierde plaats staat maar ongeveer 50 % van de beschikbare straalenergie ter beschikking voor het uitlezen van het informatiespoor. De rest van de energie wordt gebruikt in de twee sub-beams.

Vandaar dat men bij Philips al in een vroeg stadium het systeem met straalsplitsing in het research-stadium heeft gelaten en alle verder onderzoek heeft toegespitst op het ontwerpen van praktisch bruikbare enkelstraals-systemen.

7.4 De optische pick-up

Twee systemen

Voor het detecteren van de gereflecteerde lichtstraal staan bij het single-spot systeem twee systemen ter beschikking:

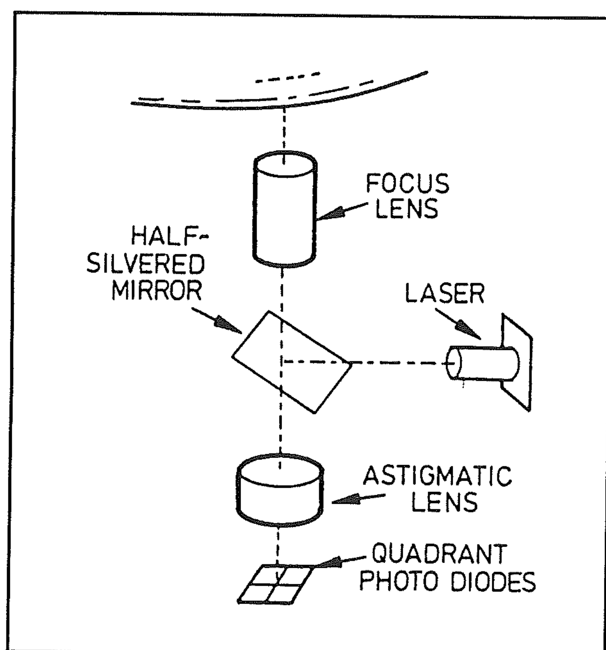
- het systeem met vier in kwadrant opgestelde foto-detectoren;
- het systeem met vier in-line opgestelde foto-detectoren.

Het kwadrant systeem

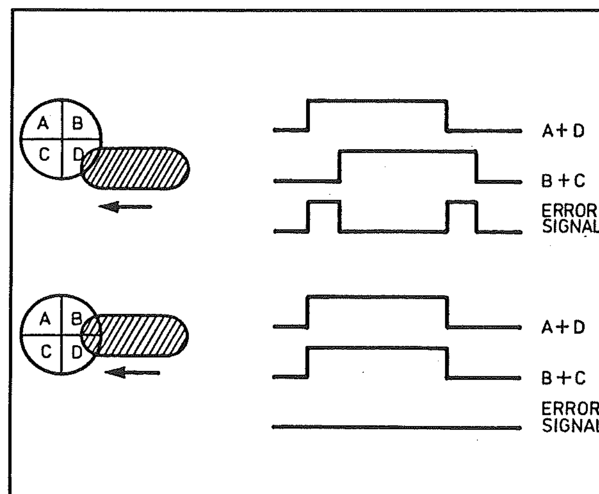
Het principe van het kwadrant systeem is geschetst in figuur 5/7.4-15.

De vier dioden worden nu niet alleen gebruikt voor het regelen van de focussering, maar ook voor het besturen van de spoorvolging.
De werking van dit systeem wordt toegelicht aan de hand van figuur 5/7.4-16.

Als de straal precies op de de informatiespiraal is gericht, zal het teruggekaatste signaal precies in het midden van het diode-kwartet vallen (onderste figuur).



Figuur 5/7.4-15: Het principe van het single-spot kwadrant systeem.



Figuur 5/7.4-16: De straalvolging bij het kwadrant systeem.

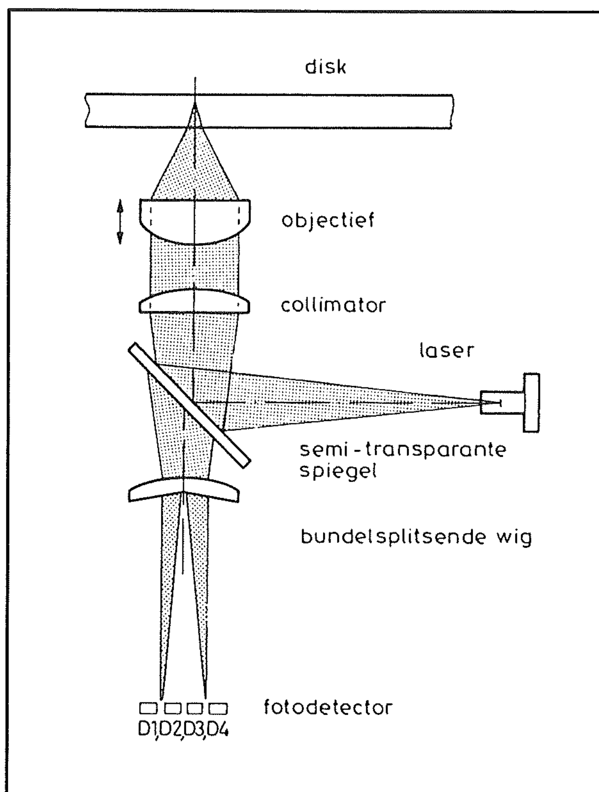
De twee somversterkers A+D en B+C van figuur 5/7.4-14 leveren identieke signalen af. De comparator die beide signalen met elkaar vergelijkt levert dan geen signaal af.

Als echter de straal iets te veel naar links of recht op de spiraal invalt, dan zal ook het teruggekaaste signaal niet precies in het midden van de dioden invallen (bovenste figuur).
In het getekende voorbeeld zal eerst de somversterker A+D signaal leveren, de somversterker B+C zal iets later geactiveerd worden.
De comparator levert dus een verschilpuls af, waarvan de positie ten opzichte van de A+D en B+C pulsen een maat is voor de richting van de afwijking. De elektronica kan deze positie evalueren en omzetten in een besturingssignaal voor de regelversterker.

Het in-line systeem

Bij het in-line systeem wordt de teruggekaaste straal, zie figuur 5/7.4-17, is tweeën gesplitst.
De twee deelstralen vallen in op vier fotodioden die op één rij staan.

7.4 De optische pick-up



Figuur 5/7.4-17: Het principe van het single-spot in-line systeem.

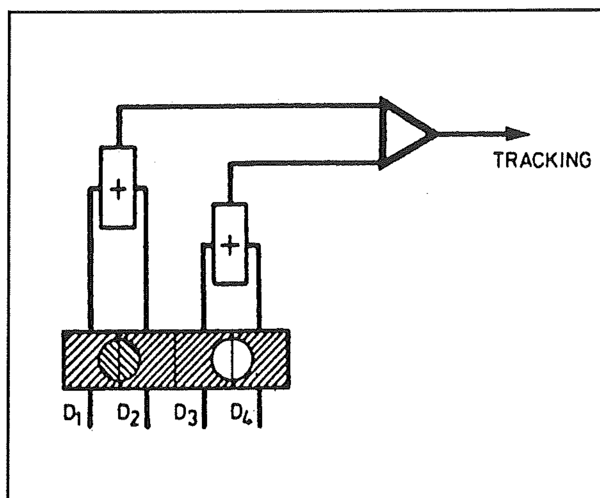
Dit effect wordt verkregen door na het halfdoorlatende prisma een bundelsplitsende wig in het pad van de lichtstraal op te nemen.

Als alles goed gaat, dus lichtstraal precies gefocusseerd in het midden van de informatiespiraal, dan zullen beide deelbundels de vier dioden even veel belichten. De ene bundel belicht D1 en D2, de tweede D3 en D4. Het systeem is in evenwicht.

Spoorvolging bij het in-line systeem

Bij het in-line systeem wordt aan het spoeltje dat de optische pick-up heen en weer beweegt, een klein wisselspanningssignaaltje met een frequentie van 600 Hz aangeboden. Het gevolg is dat de gehele constructie gaat trillen met deze frequentie en dat dus ook de lichtstraal heen en weer beweegt.
De amplitude van deze oscillatie is echter zeer klein: de lichtstraal oscilleert ongeveer 0,05 µm heen en weer. Deze mechanische modulatie veroorzaakt een optische modulatie van de teruggekaatste straal. De intensiteit van beide deelbundels gaat op het ritme van het 600 Hz signaal op en neer.

Als de straal goed gericht is zullen beide deelbundels in gelijke mate gemoduleerd zijn.
Als echter de straal iets naar links of naar rechts afwijkt, dan zal een van de deelstralen meer gemoduleerd worden dan de andere. Men zou kunnen zeggen dat dank zij de optische eigenschappen van het systeem een van de deelstralen iets helderder wordt dan de andere.
Het is nu niet erg moeilijk om met behulp van de eenvoudige schakeling van figuur 5/7.4-18 uit dit verschil in intensiteit een stuursignaal voor de servo-schakeling af te leiden.



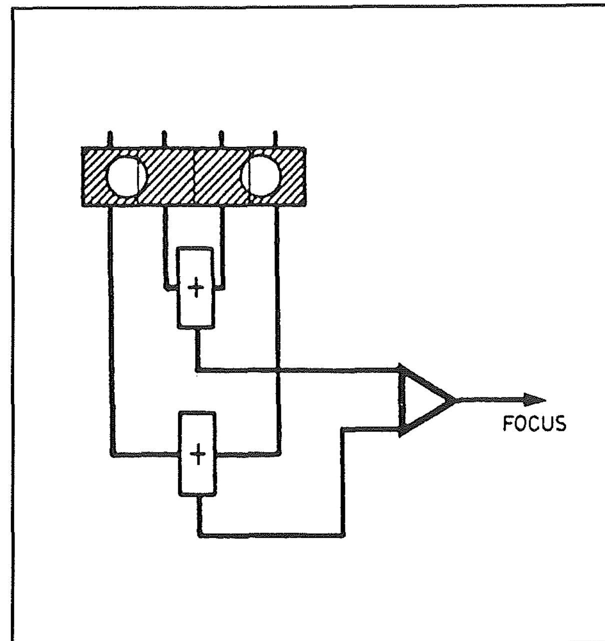
Figuur 5/7.4-18: Twee sommeerversterkers en een verschilversterker berekenen het stuursignaal voor de spoorvolging.

7.4 De optische pick-up

Focussering bij het in-line systeem

Als de lichtstraal goed gefocusseerd is op de reflecterende laag van de compact disk, dan zal het optische systeem twee scherpe deelbundels op de diode-matrix projecteren. De ene valt precies in tussen D1 en D2, de tweede precies tussen D3 en D4.

Als echter de spot uit focus geraakt zal het optische systeem de afstand tussen beide deelbundels vergroten of verkleinen. Het gevolg is, zie figuur 5/7.4-19, dat ofwel D2 en D3 ofwel D1 en D4 meer belicht worden. Ook nu kan men deze optische informatie door middel van twee sommeer- en een verschilversterker omzetten in een besturingssignaal voor de focusseringsspoel.



Figuur 5/7.4-19: De focusseerschakeling bij het in-line systeem.

5/7.5 Signaalverwerking in de CD-speler

Blokschema van een CD-speler

Drie grote delen
Het algemene blokschema van een CD-speler kan voorgesteld worden door het blokschema van figuur 5/7.5-1.

In dit schema kunnen drie grote delen onderscheiden worden, namelijk:
- De demodulator:
  Deze schakeling zorgt voor de primaire reconstructie van de kanaalbitstroom uit de signalen die door de dioden in de optische pick-up geleverd worden. Daarnaast vormt deze schakeling de stuursignalen voor het besturen van de pick-up.
- De digitale elektronica:
  Deze zorgt voor de foutreconstructie en het scheiden van de verschillende informatie die de kanaalbitstroom bevat.
- De analoge elektronica:
  Deze zet de 16 bit lange audiowoorden weer om in analoge signalen.

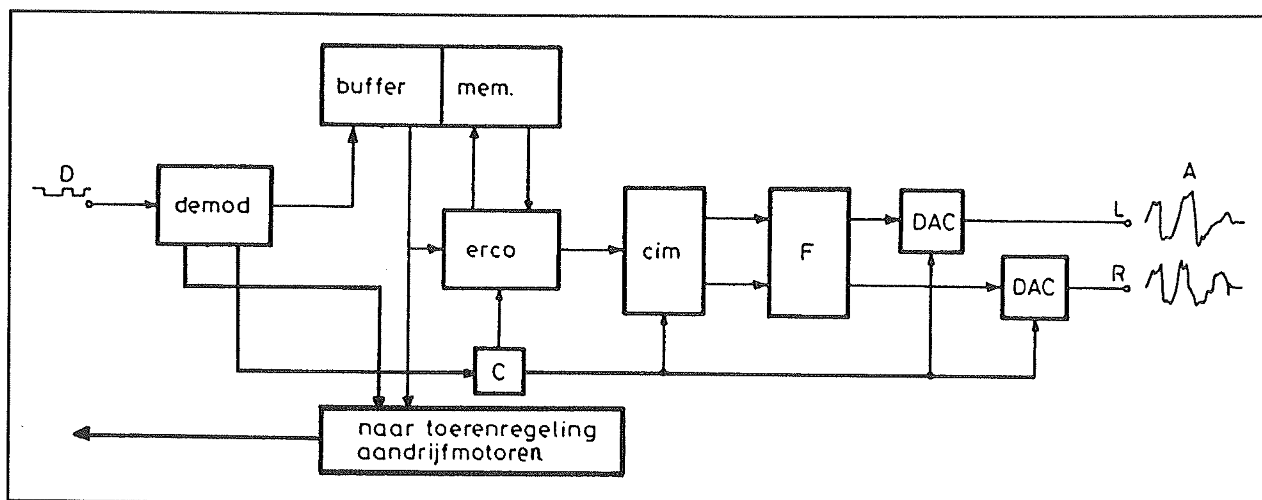
In dit subkopje wordt de functie van deze blokken in het kort besproken. Nadien volgen een aantal afzonderlijke subkopjes, waarin gedetailleerder wordt ingegaan op de werking van deze blokken. Het zal namelijk blijken dat er nogal wat problemen opgelost moeten worden!

Opmerking
In moderne CD-spelers zal men vaak tussen de digitale en de analoge blokken nog een extra schakeling aantreffen, het zogenaamde digitale filter. Dit is in figuur 5/7.5-1 voorgesteld door het blokje F. Over de belangrijke functie van deze extra elektronica zal in de loop van dit hoofdstuk het nodige geschreven worden!

De demodulator
De van de fotodioden ontvangen zeer kleine signalen moeten eerst worden voorversterkt. Dat is de eerste taak van de demodulator.
In dit blok worden ook de noodzakelijke wiskundige analoge bewerkingen op de signalen van de dioden uitgevoerd voor het besturen van de servomotoren of spoelen voor de focussering en de spoorvolging.

Vervolgens vormt de demodulator een mooi digitaal signaal, de elektronische reconstructie van de bitstroom die op de CD aanwezig is. De impulstrein die van de CD wordt ontvangen heeft echter last van wat "fasejitter" wordt genoemd. Als bijvoorbeeld tegen het apparaat gestoten wordt zullen er trillingen in de mechanische constructie optreden.

7.5 Signaalverwerking in de CD-speler



Figuur 5/7.5-1: Het algemene blokschema van een CD-speler.

Deze trillingen hebben tot gevolg dat de impulsstroom die wordt uitgelezen kleine variaties in de tijd gaat vertonen. Hetzelfde effect kan optreden als de CD een beetje vervormd is.
Om deze fasejitter te elimineren levert de demodulator de kanaalbitstroom aan een buffergeheugentje BUFFER. Dit geheugen wordt met een kristalgestabiliseerde oscillator geleegd.
Bovendien wordt de vullingsgraad van dit geheugen gecontroleerd. De demodulator zal er voor zorgen dat het geheugen steeds voor de helft gevuld blijft. Vanuit het buffergeheugen wordt de vullingsgraad doorgegeven aan de toerentalregeling van de aandrijfmotor van de CD. Als het geheugen meer gevuld wordt dan de helft zal de motor langzamer gaan draaien, waardoor minder impulsen per tijdseenheid van de CD worden gelezen en de vullingsgraad van het geheugen weer daalt.
Groot voordeel van dit systeem is dat het toerental van de aandrijfmotor niet erg kritisch is. Het is immers niet dit toerental dat de verwerkingssnelheid van de bits bepaalt, maar de kristalgestuurde oscillator in de demodulator!

De optische pick-up levert een signaal waarvan alleen de plaats van de "enen" in de code vastligt. De "enen" komen immers overeen met de tikken, de overgangen tussen de nokken en de dammen. Essentieel voor de goede werking van de CD-speler is dat in de modulator het juiste aantal "nullen" tussen deze "enen" worden ingevoegd.
Om dat mogelijk te maken moet er een klokoscillator C in de demodulator aanwezig zijn die in de pas loopt met de (verdwenen) klok op de CD. Het zal duidelijk zijn dat daarvoor alleen een PLL-oscillator in aanmerking komt.

Deze oscillator wordt gesynchroniseerd door de synchronisatiebytes in de kanaalbitstroom die van de CD komt. Deze bytes bevinden zich in de aanvang van ieder frame en zijn door hun ondubbelzinnige samenstelling heel gemakkelijk te herkennen. De demodulator gebruikt deze bytes voor het afleiden van een besturingssignaal voor de PLL. Dat gaat erg eenvoudig. Zoals bekend moet een SYNC-byte 2 x tien "nullen" bevatten. Als de PLL-oscillator tussen de twee tikken die het SYNC-byte bevat meer of minder dan 10 "nullen"

7.5 Signaalverwerking in de CD-speler

genereert is zijn frequentie te hoog of te laag.
Eenmaal in de pas zal de PLL-oscillator een signaal opwekken dat in fase loopt met de verdwenen klok van de CD.
Het is nadien technisch geen enkel probleem om op de juiste momenten het juiste aantal "nullen" in de datastroom in te voegen.

De digitale elektronica
De digitale schakelingen moeten alle informatie die verborgen zit in de 43 CD-bytes waaruit een frame bestaat uit elkaar halen en op de juiste manier bewerken.
Omdat de gegevens onder seriële vorm worden aangevoerd en het voor deze bewerkingen noodzakelijk is dat de samenstelling van verschillende frames bekend is, worden de seriële gegevens eerst in een tweede geheugen MEM opgeslagen.

De ERCO, de "error correction" zal aan de hand van de Q- en P-parity bytes (deze staan immers op een vaste plaats in de code en kunnen dus uit bepaalde adressen van het geheugen uitgelezen worden) de allereerste foutcorrectie toepassen.
Nadien gaat de code naar de CIM, de "Cross Interleave Modulator", waarin de verhusseling van het signaal wordt opgeheven. Fouten die niet door de ERCO konden worden hersteld worden in de CIM aangepakt. Schakelingen in deze CIM maskeren dit soort fouten door uit de voorgaande en volgende bytes gemiddelde waarden te berekenen en deze in de code in te voegen. Ook is de CIM verantwoordelijk voor het sturen van de audio-MUTE die niveauverschillen als gevolg van niet geslaagde maskeringen onhoorbaar maakt.
Nadat de CIRC ontvlochten is kunnen de subcodebytes worden bevrijd. Deze worden verder verwerkt in speciale schakelingen.

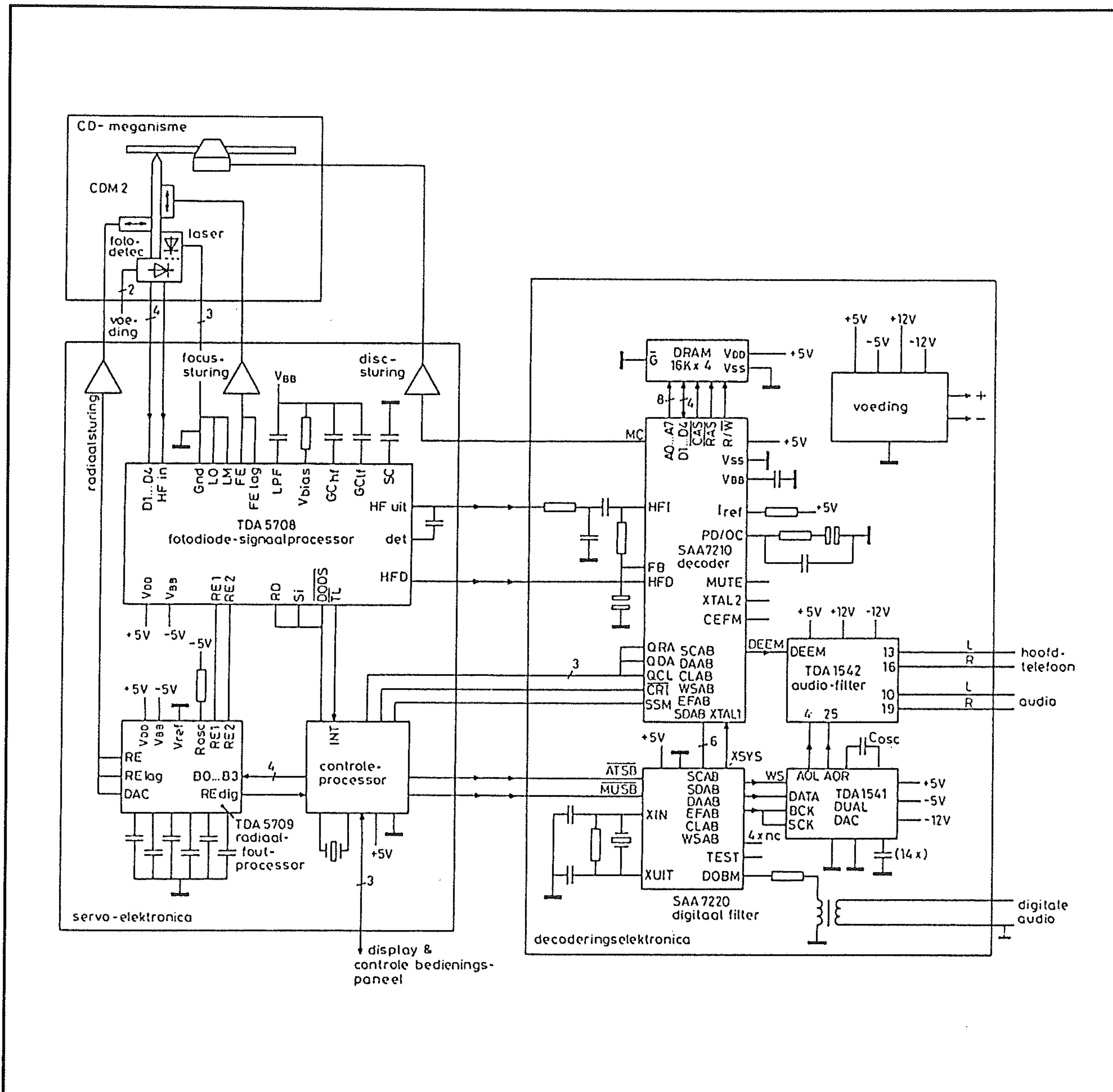
Tot besluit zorgt de CIM ervoor dat de 4 audiobytes weer worden samengevoegd tot 2 x 16 bit woorden, dezelfde woorden die aan de basis stonden van het opnameprocédé.

De audio-bytes worden vervolgens ofwel aangeboden aan het digitale filter, ofwel rechtstreeks naar de digitaal naar analoog omvormers DAC gevoerd, die de digitale code omzetten in een analoog signaal. In de DAC's zijn analoge filters aangebracht die tot taak hebben de hoogfrequente residuen, die als gevolg van het DAC-proces op het analoge signaal aanwezig zijn, weg te filteren.

Opmerkingen

- Opmerking 1
  Het getekende blokschema kan niet opgevat worden als hét blokschema volgens hetwelke alle CD-spelers werken. Diverse fabrikanten passen een andere volgorde van signaalbewerking toe. Zo wordt vaak de eerste correctieschakeling onmiddellijk na de demodulator opgenomen en zal eerst dan het signaal ingelezen worden in het buffergeheugen.
- Opmerking 2
  CD-spelers zijn zeer hoog-geïntegreerde apparaten. In de moderne versies wordt het onvoorstelbaar ingewikkelde signaalverwerkingsproces uitgevoerd met zeven en soms zelfs met slechts vijf IC's! Deze IC's zijn zeer complex en het is in de meeste gevallen niet zo dat deze IC's ieder slechts de functies van één van de blokjes van het blokschema van figuur 5/7.5-1 uitvoeren. De functies lopen vaak door elkaar.

7.5 Signaalverwerking in de CD-speler



Figuur 5/7.5-2: Het IC-blokschema van een tweede generatie CD-speler van Philips.

Als voorbeeld is in figuur 5/7.5-2 het IC-blokschema van een tweede generatie CD-speler van Philips getekend.

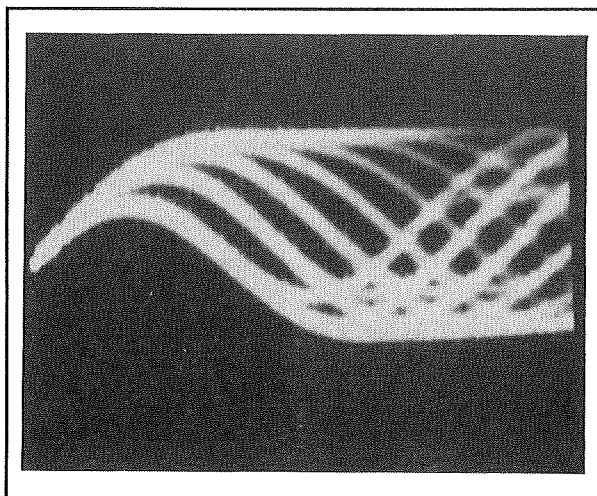
De functies van het blokje "DEMODULATOR" uit het algemene blokschema worden hier vervuld door de TDA5708, de TDA5709 en een deel van de SA7210. Dit laatste IC voert dan weer de functies uit die in het algemene blokschema zijn omschreven door de blokken "ERCO" en "CIM".

Tot nu toe zijn alleen de blokken "F" en "DAC" zeer duidelijk aan individuele IC's toe te wijzen. In het praktische Philips-schema worden de functies van het digitale filter uitgevoerd door de SAA7220 en de digitaal naar analoog omzetting door

een TDA1541. De analoge uitgangsfilters zijn in handen van de TDA1542.

Details van de demodulator

Het bewerken van de diodesignalen
Zoals verklaard in een van de vorige hoofdstukken zal het wisselspanningssignaal dat uit de dioden van de optische pick-up komt een gelijkspanningscomponente bevatten. Deze componente wordt veroorzaakt door de niet symmetrische structuur van de datasamenstelling. Weliswaar wordt deze gelijkspanning geminimaliseerd door het invoegen van de DSV-bytes, maar toch blijft het verschijnsel bestaan.
Deze DC-spanning zou geen problemen opleveren als het signaal dat uit de fotodioden kwam zeer steile flanken had. Dat is, zoals uit de reële schermbeeldfoto van figuur 5/7.5-3 blijkt, echter alles behalve het geval!



Figuur 5/7.5-3: Het uitgangssignaal van een van de fotodioden uit de optische pick-up.

Deze zeer afgevlakte voor- en achterflanken van de puls die uit de optische pick-up komt stellen de tikken in de plaat voor.

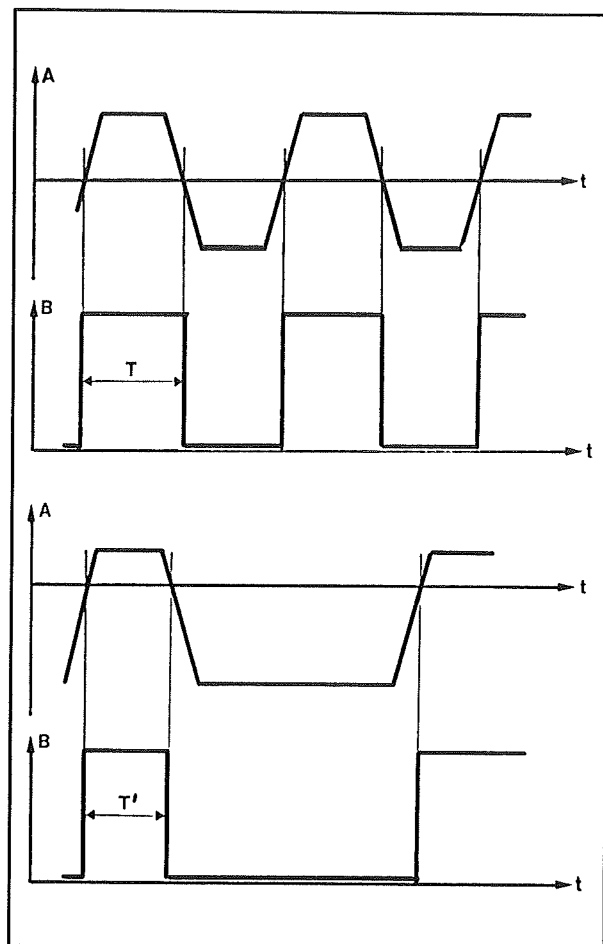
Het zal duidelijk zijn dat het zeer belangrijk is dat de onderlinge tijdsrelatie van de tikken op de plaat precies wordt hersteld in het elektronische signaal. Deze tikken stellen immers de "enen" uit het signaal voor.
Ontstaan er tijdverschuivingen tussen de onderlinge tijdsrelatie van de tikken op de plaat en de onderlinge tijdsrelatie van de flanken van het elektronisch signaal, dan treedt een vorm van jitter op.

Het volstaat niet het diodesignaal in een comparator te vergelijken met een vast niveau, bijvoorbeeld de massa. Door de introductie van het DC-signaal zal namelijk het signaal op en neer schommelen rond de nul, met dat wat in figuur 5/7.5-4 is getekend als gevolg.

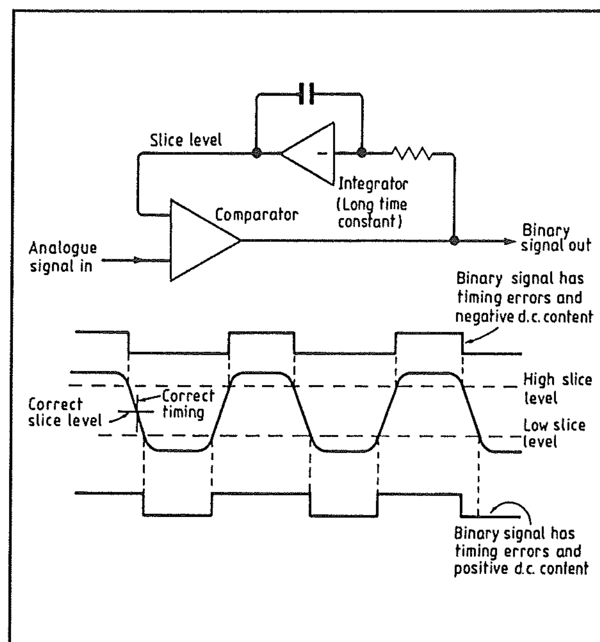
In de bovenste figuur wordt het diodesignaal (A) in de comparator vergeleken met de nul.
Op de uitgang van de comparator ontstaat een blokvormig signaal (B), waarvan de overgangen samenvallen met de nuldoorgangen van het diodesignaal. De afstand tussen twee tikken wordt omgezet in een periode T.

In de onderste figuur bevat het diodesignaal een negatieve gelijkspanning, dit als gevolg van de tijdelijke asymmetrie van dat signaal.
Zou men nu dit signaal weer in een comparator vergelijken met de nul, dan is het gevolg dat dezelfde afstand tussen twee tikken een periode T' tot gevolg heeft, die duidelijk smaller is dan de periode T.

7.5 Signaalverwerking in de CD-speler



Figuur 5/7.5-4: Vergelijking van de comparator-uitgang bij een diodesignaal zonder (boven) en met DC-inhoud (onder).



Figuur 5/7.5-5: Het principe van de meelopende comparator.

Slicing comparator

Dit verschijnsel kan worden opgelost door een meelopende comparator (slicing comparator) toe te passen. Het basisschema van een dergelijke schakeling is getekend in figuur 5/7.5-5.

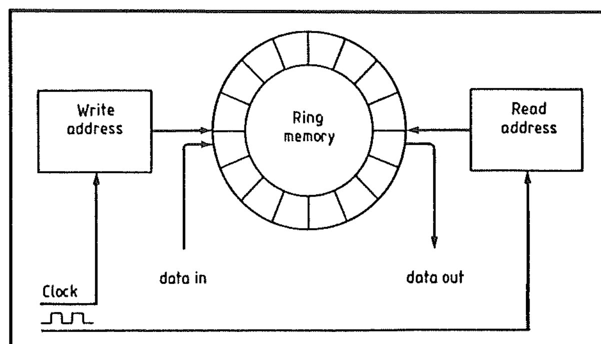
De uitgangsspanning van de comparator wordt toegevoerd aan een integrator met een redelijk grote tijdconstante. Deze schakeling zal de gemiddelde gelijkspanningswaarde van de uitgangsspanning berekenen.

Dit signaal wordt als comparatordrempel aan de drempelingang van de comparator aangeboden.
Als, zoals getekend in de onderste tekening van figuur 5/7.5-4, het signaal een gemiddelde negatieve gelijkspanning bevat zal de integrator de drempelingang van de comparator instellen op een negatieve spanning. Het gevolg is dat het diodesignaal nu weer op het juiste moment (in het midden van de top-tot-top waarde) gelijk wordt aan de drempelspanning en periode T' ongeveer gelijk wordt aan periode T.
Uiteraard hangt de goede werking van deze meelopende comparator af van de juiste instelling van de integrator.

De timebase corrector

De timebase corrector is de schakeling die het buffergeheugen bestuurt en het toerental van de motor regelt.

7.5 Signaalverwerking in de CD-speler



Figuur 5/7.5-6: Schematische samenstelling van het buffergeheugen of de timebase corrector.

In de meeste gevallen wordt gebruik gemaakt van een klein ringgeheugen en twee adrestellers. Het principiële schema is getekend in figuur 5/7.5-6.

De "write address"-teller wordt geclocked door een signaal dat afgeleid wordt van de herwonnen kanaalbitstroom van de CD. De "read address"-teller wordt, zoals reeds gezegd, gestuurd uit een kristalclock. Het systeem stelt de snelheid van de motor zo in dat er ongeveer 180 ° verschil bestaat tussen het adres waarin wordt geschreven en het adres waaruit wordt gelezen.
Dat kan op twee manieren gebeuren.
Sony maakt gebruik van een fasevergelijking tussen de periode van de lees- en de periode van de schrijfclock. Door middel van een PLL-schakeling wordt een stuursignaal voor de motor uit deze fasevergelijking afgeleid.
Het tweede systeem werkt digitaal. Het vergelijkt de lees- en schrijfadressen. Als de motor te snel draait zal het schrijfadres zich naar het leesadres verplaatsen. Als de motor te traag draait zal het schrijfadres zich van het leesadres verplaatsen. Dit kan vastgesteld worden door een binaire vergelijking van de adressen. Uit deze vergelijking wordt een stuursignaal voor de motor afgeleid.

De speed corrector

De beschreven systemen kunnen alleen goed werken als er bij het starten van de CD-motor al een tamelijk nauwkeurige overeenkomst bestaat tussen de snelheid waarmee de gegevens worden ingelezen en weer uitgelezen. Ook de PLL-oscillator die zorgt voor het herwinnen van de "nullen" in de kanaalbitstroom heeft maar een beperkt regelbereik.
Het is dus absoluut noodzakelijk dat de motor zo snel mogelijk op ongeveer het juiste toerental wordt gebracht.
Daarvoor is een speciale schakeling aanwezig die "speed corrector" wordt genoemd.

In de meeste gevallen wordt gebruik gemaakt van het meten van de minimale en maximale afstanden tussen de tikken op de CD. Zoals verklaard in een van de vorige hoofdstukken zullen er nooit minder dan twee en nooit meer dan tien "nullen" achter elkaar voorkomen. Als T de fundamentele periode van het signaal op de CD voorstelt, dan kan men dus stellen dat twee tikken nooit dichter dan 3 T en nooit verder dan 11 T van elkaar liggen. Tijdens het op toeren komen van de motor wordt de tijdsduur tussen twee tikken voortdurend gemeten. Als er tijden van meer dan 11 T worden gemeten betekent dit dat de motor nog steeds te traag draait. Meet het systeem tijden die kleiner zijn dan 3 T, dan draait de motor te snel en moet afgeremd worden.
Nadat de PLL-oscillator zichzelf heeft ingelocked kan de speed corrector uitgeschakeld worden. De timebase corrector neemt dan de besturing van de motor over.

Dit systeem gaat er uiteraard van uit dat er regelmatig minimale en maximale afstan-

den tussen de tikken op de plaat voorkomen. Dat is een van de redenen waarom de Q- en de P-parity data bij het samenstellen van de CD-code worden geïnverteerd.

De speed corrector wordt ook ingeschakeld als men de search-functies van het apparaat gebruikt. De optische pick-up wordt dan naar een andere spiraal gestuurd en het kan gebeuren dat de PLL-oscillator daardoor uit lock komt. De speed corrector zorgt dan weer voor een snelle maar groffe correctie van het toerental van de motor.

Details van het digitale systeem

De foutcorrectie

De werking van de twee systemen voor foutcorrectie is reeds besproken in hoofdstuk 5/7.3 en wordt hier niet herhaald.

De CIRC-ontvlechting

Bij het voorbereiden van de CD-code wordt gebruik gemaakt van vertragingslijnen voor het verhusselen van de code volgens het CI-procédé.
Het zal duidelijk zijn dat deze verhusseling weer kan worden ontvlochten door in de CD-speler identieke vertragingslijnen toe te passen, maar dan in de omgekeerde volgorde.

Er bestaat echter een alternatief systeem. In een CD-spelers is naast het ringgeheugen nog een tweede ongeveer 2 kB groot RAM-geheugen aanwezig, waarin de CD-gegevens tijdelijk worden opgeslagen. De gegevens worden serieel in dit geheugen ingelezen.

Het is nu mogelijk deze gegevens te ontvlechten door dit RAM-geheugen volgens een bepaald adrespatroon uit te lezen. Op deze manier kan men de 2 x 6 audiosymbolen volgens de juiste samenstelling herwinnen uit de verhusselde code die in het RAM-geheugen staat.

De EFM-demodulatie

Het omzetten van de uit 14 bit bestaande CD-bytes naar de oorspronkelijke bytes met 8 bit gaat door middel van een codetabel die in een ROM-geheugen is ondergebracht.
In deze codetabel zijn alle toegestane 14 bit woorden opgeslagen, met hun vertaling naar de overeenkomstige 8 bit brede "normale" woorden.

Samenstelling van de 16 bit audiowoorden

De vier 8 bit brede woorden van een rechter en linker monster worden in twee serieel in parallel uit registers samengevoegd tot de oorspronkelijke 16 bit brede audiomonsters en op 2 x 16 digitale uitgangen ter beschikking gesteld aan het analoge deel van de schakeling van de CD-speler.

The rest is silence

Uiteraard is hiermee niet alles gezegd wat er over de digitale signaalverwerking in een CD-speler te zeggen valt. Het verwerken van de subcode-bytes, de centrale besturing vanuit een microprocessor, het bedieningstoetsenbord en de displayfuncties moeten onbesproken blijven. Hoe al deze blokken werken is waarschijnlijk alleen tot in alle details bekend bij de gespecialiseerde ontwerpteams bij Philips en Sony die de onvoorstelbaar ingewikkelde Very Large Scale Integration IC-sets ontwerpen waarmee alle CD-spelers zijn uitgerust.

7.5 Signaalverwerking in de CD-speler

Basisprincipes van de analoge CD-elektronica

Inleiding
In principe lijkt de taak van de analoge elektronica van een CD-speler het toppunt van eenvoud als men deze vergelijkt met de ingewikkelde functies van de digitale elektronica: zet de 44.100 x 2 x 16 bit brede digitale codes die per seconde het digitale deel verlaten om in mooie analoge spanningen.
Niets lijkt simpeler dan dat. Bouw twee 16 bit brede DAC's in, sluit het getrapte uitgangssignaal van deze schakelingen af met filtertjes om het trapvormige verloop van de uitgangsspanningen af te vlakken en dat is dat!

Niets is echter minder waar! Het is nu net in dat analoge deel dat de grote verschillen zitten tussen een CD-speler van het type A van merk B en een CD-speler van het type X van merk Y. Specialisten beweren zelfs dat zij in staat zijn alleen aan de klankkleur van het door een CD-speler geproduceerde geluid merk en bouwjaar te kunnen achterhalen!

Men kan zonder meer stellen dat de aandacht die aan de analoge elektronica is besteed de kwaliteit van een CD-speler bepaalt.

Bij het omzetten van de digitale codes in analoge spanningen worden de ontwerpers weer geconfronteerd met alle in de analoge elektronica ingebouwde zwakheden, zoals signaalvervormingen, looptijdverschillen, opslingeringen en faseverschuivingen. Dat zijn grootheden waarvan de ideale waarde, namelijk nul, in de praktijk alleen benaderd kan worden. Maar dat zijn dus ook grootheden waarvan deze ideale waarde steeds opnieuw door kleine verbeteringen van bestaande schakelingen beter benaderd kan worden!

Daarnaast speelt uiteraard ook een psychologisch effect mee. Zoals reeds diverse malen gesteld zijn de functies van het digitale deel van de schakeling van een CD-speler zo onvoorstelbaar complex, dat alleen de echte reuzen uit de internationale consumer elektronica-industrie, met name Philips en Sony, in staat zijn voldoende kapitaal en menskracht te besteden aan het steeds opnieuw bedenken en ontwerpen van nog verder geïntegreerde chipsets die al deze functies met weer minder IC's uitvoeren. Het is absoluut ondenkbaar dat kleine, onafhankelijke Hififabrikanten dergelijke schakelingen zélf kunnen ontwerpen. Iedere fabrikant van CD-spelers is dus voor dat deel van de elektronica van zijn producten aangewezen op Sony of Philips.

Toch wil uiteraard iedere fabrikant zijn producten iets eigens meegeven. Dat kan alleen in de analoge elektronica. Geïntegreerde digitaal naar analoog omzetters worden immers door tientallen IC-fabrikanten aangeboden, zodat iedere fabrikant van CD-spelers eigen IC-voorkeuren in eigen ontworpen schakelingen kan toepassen. Bovendien zijn de principes van digitaal naar analoog omzetting en alles wat daarbij hoort uiteraard al veel langer bekend en in gebruik dat de specifieke CD-techniek.

Aan systemen geen gebrek!
Een en ander heeft ertoe geleid dat er enige tientallen verschillende systemen worden toegepast om de digitale audioco-

des om te zetten in analoge spanningen. Bovendien is het einde nog lang niet in zicht.
Steeds opnieuw verzinnen fabrikanten van CD-spelers nieuwe systemen en schakelingen die nog minder vervormen en nog transparanter geluid produceren dan alles wat op de markt is.

Een kort, maar onvolledig overzicht van de DAC-systemen die tegenwoordig worden toegepast:

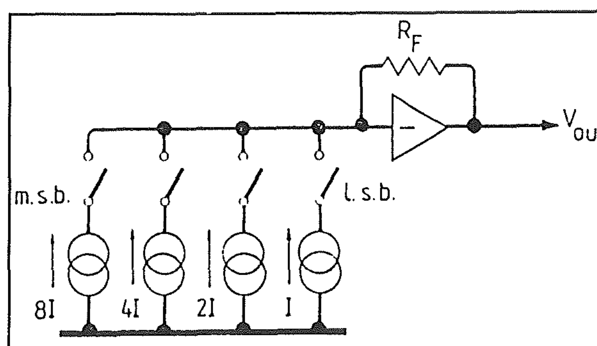
- 14 bit switched real sampling;
- 14 bit real sampling;
- 16 bit switched real sampling;
- 16 bit real sampling;
- 16 bit cascaded real sampling;
- 14 bit dual upsampling;
- 16 bit dual upsampling;
- 14 bit quadruple upsampling;
- 16 bit quadruple upsampling;
- adaptive floating decimal upsampling;
- pulse width modulation convertion;
- 1 bit switched capacitor convertion.

In het vervolg van dit hoofdstuk zullen deze principes min of meer uitvoerig besproken worden.
Dat heeft echter geen zin als niet eerst tamelijk diepgaand wordt ingegaan op de basisprincipes en de fundamentele tekortkomingen van digitaal naar analoog omzetting.

De traditionele DAC
Geïntegreerde digitaal naar analoog omzetters bestonden uiteraard reeds lang voordat er sprake was van een verschijnsel dat "CD" zou gaan heten. Deze DAC's werden in de meet- en regeltechniek gebruikt voor het omzetten van digitale woorden in analoge spanningen. De resolutie van deze schakelingen ging van 4 tot 10 bit.

Het ligt voor de hand dat de ontwerpers van het CD-systeem in eerste instantie hebben voortgeborduurd op de bestaande en tamelijk vertrouwde schakelingen waarmee deze traditionele DAC's werkten.

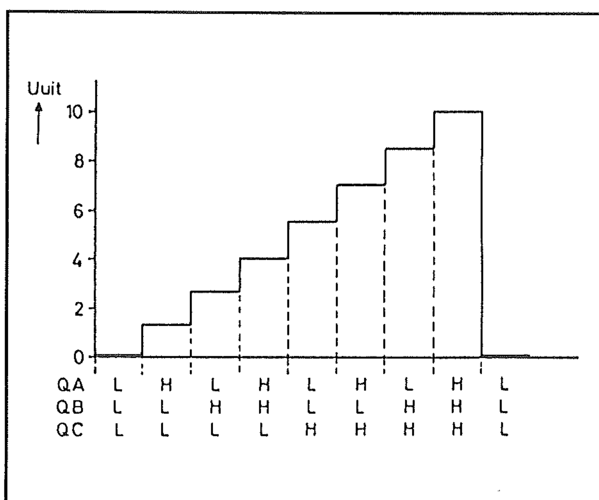
In figuur 5/7.5-7 is het basisprincipe van een traditionele 4 bit brede geïntegreerde DAC getekend.



Figuur 5/7.5-7: Basisschema van een traditionele 4 bit brede DAC.

De schakeling bestaat uit vier stroombronnen, die zeer constante stromen genereren die een zeer nauwkeurige onderlinge verhouding hebben van 1/2/4/8. Deze stromen vloeien via elektronische schakelaars MSB tot en met LSB naar de ingang van een stroom naar spanning omzetter. Deze schakeling is op de bekende manier samengesteld uit een operationele versterker met een terugkoppelingsweerstand R_F. De schakelaars worden bediend door de vier bits van de digitale ingangscode. Als een bit "H" is sluit de schakelaar. Als de code "L-L-L-L" (van MSB naar LSB) is zullen alle schakelaars open staan en vloeit er geen stroom naar de ingang van de op-amp. De uitgangsspanning is nul. Als de code wordt verhoogd tot "L-L-L-H" zal de LSB-schakelaar sluiten. Er vloeit nu een stroom I naar de ingang van de opamp. Deze stroom wordt omgezet in een

spanning ΔU. Als de digitale code wordt opgehoogd tot "L-L-H-L" zal de tweede schakelaar sluiten en de eerste weer openen. Er vloeit nu een stroom 2.I naar de op-amp, het gevolg is dat op de uitgang een spanning ontstaat van 2.ΔU.
Men kan dus besluiten dat als men de code op de digitale ingangen stapsgewijs verhoogt van "L-L-L-L" naar "H-H-H-H" er op de uitgang van de DAC een trapvormig verlopende spanning ontstaat, waarvan iedere stap ΔU groter is dan de vorige. Dit verband tussen digitale ingangscode en analoge uitgangsspanning is in figuur 5/7.5-8 getekend voor een drie bit brede DAC.



Figuur 5/7.5-8: Het verband tussen de digitale ingangscode en de analoge uitgangsspanning van een 3 bit brede DAC.

Begrenzingen van de traditionele DAC

De besproken schakeling werkt uitstekend voor resoluties tot 10 bit en bij lage snelheden. Het CD-systeem werkt echter met niet minder dan 16 bit en bovendien met een tamelijk hoge snelheid. De traditionele DAC laat het onder deze omstandigheden volledig afweten!
Er zijn twee problemen, namelijk:

- de nauwkeurigheid van de stroomverhouding van de stroombronnen;
- de schakelsnelheid van de stroombronnen en elektronische schakelaars.

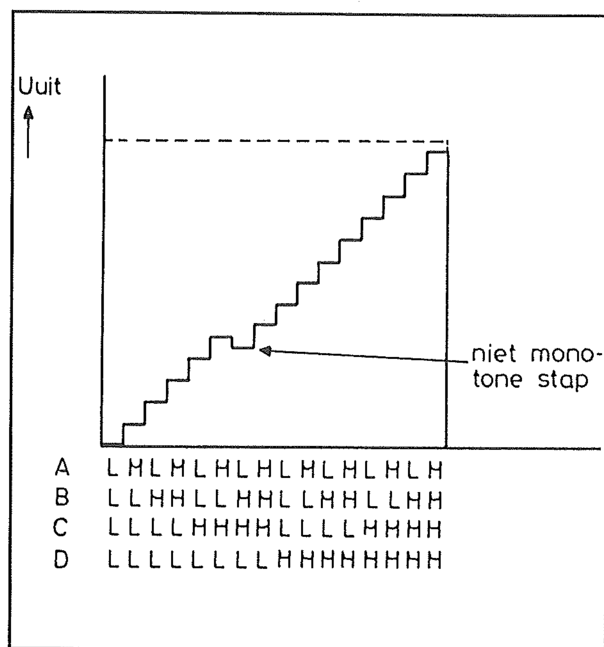
Deze twee problemen worden in de volgende paragraafjes besproken.

De nauwkeurigheid

Zoals gezegd ontstaat op de uitgang van een DAC een trapvormige spanning als aan de ingang alle mogelijke codecombinaties van het digitale woord in de logische volgorde worden doorlopen. Het zal duidelijk zijn dat iedere trap alleen precies ΔU groter is dan de vorige als de onderlinge verhouding van de stromen die de stroombronnen genereren klopt. Als een van de stroombronnen een te grote tolerantie heeft, dan ontstaat een verschijnsel dat men niet-monotonie noemt. Dit wordt toegelicht aan de hand van figuur 5/7.5-9.

Bij bepaalde codewisselingen zal de analoge uitgangsspanning niet met de verwachte waarde ΔU toenemen, maar met een grotere of kleinere waarde. In extreme gevallen kan dit er zelfs toe leiden dat de reële uitgangsspanning in een gebied komt te liggen dat in feite voorbehouden is aan een andere digitale code op de ingangen. In dat geval is sprake van niet-monotoon gedrag van de DAC.
Uiteraard zal dit niet alleen bij slechts één bepaalde trap gebeuren (tenzij de stroomafwijking in de stroombron van de MSB-schakelaar zit), maar zich regelmatig herhalen. Niet-monotone trappen ontstaan telkens de stroombron met de grote tolerantie in- of uitschakelt. Dit niet-monotone verschijnsel veroorzaakt een grote vervorming op het analoge uitgangssignaal.

7.5 Signaalverwerking in de CD-speler



Figuur 5/7.5-9: Het verschijnsel "niet-monotonie" grafisch toegelicht.

Nu is het technologisch gezien geen probleem om de tolerantie op de stroombronnen binnen de monotone grenzen te houden als de DAC een resolutie heeft tot 10 bit. Bij een DAC met 16 bit, noodzakelijk bij het CD-systeem, bestaat er echter een stroomverhouding van $1/2^{15}$ of 1/32.768 tussen de stroombron van de LSB en deze van de MSB! Dat betekent dat de stroombron van het MSB een nauwkeurigheid van minstens 100 / 32.768 = 0,003 % moet hebben!

Dit noemt men de "beter dan 1-LSB nauwkeurigheidseis van het MSB". Is deze nauwkeurigheid kleiner, dan werkt de DAC in ieder geval niet-monotoon en zal de stroom van het LSB volledig verdrinken in de onnauwkeurigheid van de stroom van het MSB. Er zal dan bij bepaalde codes geen enkel verband bestaan tussen de logische waarde van dit LSB-bit en de waarde van het analoge signaal.

Ook voor de MSB-1 en MSB-2 bits gelden zeer hoge nauwkeurigheidseisen!

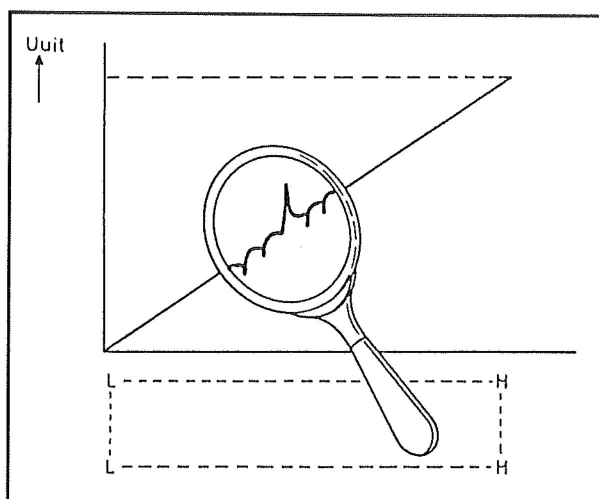
Het zal duidelijk zijn dat het fabriceren van een stroombron met een tolerantie van 0,003 % onmogelijk is. Zeker als men deze tolerantie ook over een tamelijk groot temperatuurbereik moet handhaven en de schakeling bovendien niet te duur mag worden vanwege de inbouw in een massaproduct als een CD-speler.
Zowel Philips en Sony hebben gezocht naar oplossingen voor dit probleem. Deze oplossingen worden in volgende paragrafen besproken.

De schakelsnelheid van de stroombronnen
Bij het CD-systeem leveren de digitale schakelingen 44.100 keer per seconde 2 x 16 bit brede woorden aan de ingangen van de digitaal naar analoog omzetters. De DAC's moeten dus redelijk snel werken. Nu duurt het uiteraard een bepaalde tijd, de conversietijd genoemd, alvorens alle elektronische schakelaars in de DAC zich hebben gesloten of geopend en alvorens de actieve stroombronnen zich hebben gestabiliseerd. Gedurende deze conversietijd zal de uitgangsspanning van de DAC onvoorspelbaar zijn. In de praktijk ontstaan tijdens de codewisseling zogenoemde "spikes" of "glitches" op de analoge uitgangsspanning, korte piekspanningen met ongedefinieerde grootte en polariteit. Dit verschijnsel wordt grafisch toegelicht aan de hand van figuur 5/7.5-10.

De grootte van deze "spikes" is afhankelijk van hoeveel bits er omschakelen. Hoe meer bits omschakelen, hoe meer elektronische schakelaars van de ene naar de andere toestand moeten omschakelen en

7.5 Signaalverwerking in de CD-speler

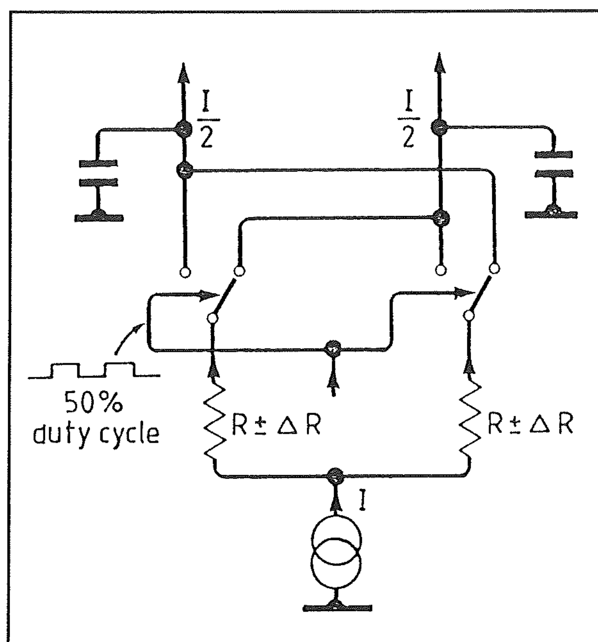
hoe onvoorspelbaarder het gedrag van de schakeling wordt.
Deze "spikes" veroorzaken een niet onaanzienlijke vervorming van het analoge uitgangssignaal van de CD-speler. Dit verschijnsel is een van de redenen waarom het absoluut noodzakelijk is filters na de DAC op te nemen. Een van de taken van dit filter is het verzwakken van deze "spikes" die voornamelijk uit hogere harmonischen bestaan.



Figuur 5/7.5-10: Het ontstaan van "spikes" bij het overschakelen van de ene digitale code naar de andere.

noemd en dit werd voor het eerst toegepast in de 14 bit speciale CD-DAC van het type TDA1540.

Het principe van deze techniek is geschetst in figuur 5/7.5-11.



Figuur 5/7.5-11: Het principe van het door Philips ontwikkelde "dynamic element matching" systeem.

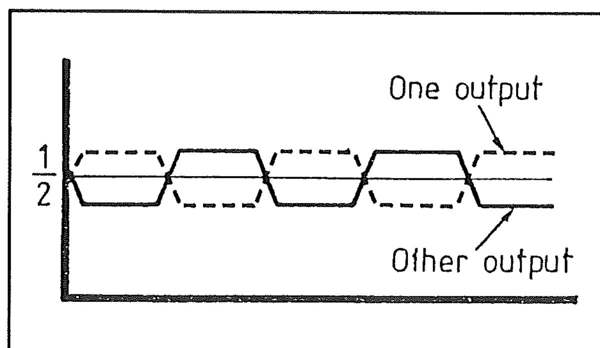
De Philips oplossing of de "dynamic element matching"

Het zal duidelijk zijn dat niet de absolute waarde van de stromen belangrijk is, maar hun onderlinge verhouding. Dat gegeven heeft Philips op het idee gebracht niet 16 verschillende stroombronnen in de DAC in te bouwen, maar slechts één. De stroom van deze bron wordt door speciale schakelingen steeds opnieuw heel precies door twee gedeeld, zodat uiteindelijk toch de juiste stroomverhoudingen ontstaan.
Dit principe wordt door de ontwerpers "dynamic element matching" (DEM) ge-

Een stroombron I levert een stroom aan twee identieke weerstanden R. Natuurlijk zijn deze weerstanden niet echt identiek, omdat deze onderdelen ieder geteisterd worden door een bepaalde tolerantie +/-ΔR. De stroom I van de stroombron zal dus omgekeerd evenredig met de reële waarde van de weerstanden over beide ketens verdeeld worden.
De twee niet gelijke stromen die door de weerstanden vloeien worden door middel van twee elektronische schakelaars snel heen en weer geschakeld tussen de twee uitgangen van de schakeling. Dat heen en

weer schakelen moet met een duty-sycle van precies 50 % gebeuren. Technisch is dat geen probleem omdat men de schakelaars kan sturen uit de uitgangen van een geclockte type-JK flip-flop. Deze levert een mooie symmetrische uitgangspuls.

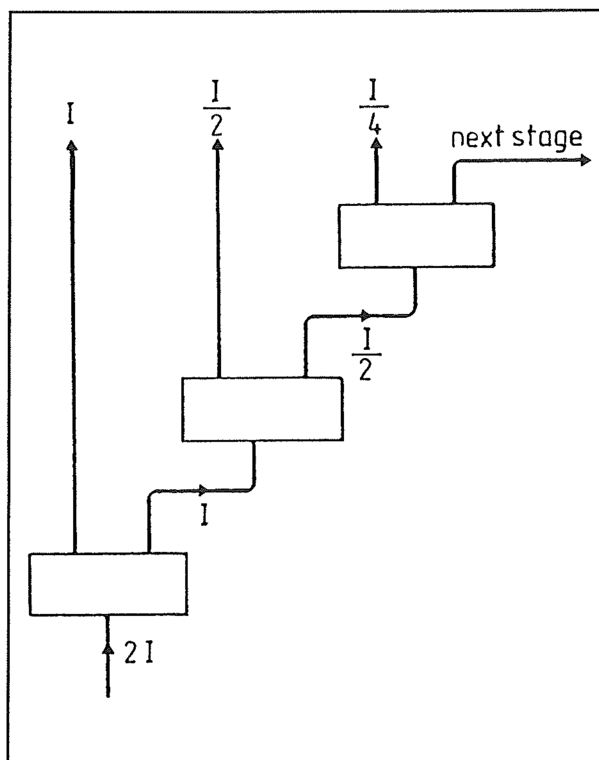
Het zal nu duidelijk zijn dat de gemiddelde stromen die naar de uitgangen stromen precies aan elkaar gelijk zijn. De linker stroom bestaan immers voor 50 % uit de stroom die door de linker weerstand geleverd wordt en voor 50 % uit de stroom die door de rechter weerstand geleverd wordt. Voor de rechter uitgang geldt precies hetzelfde. Een en ander is grafisch toegelicht in figuur 5/7.5-12.



Figuur 5/7.5-12: Het verloop van de stromen die door de twee uitgangen vloeien.

Het volstaat de twee stromen door middel van volledig onkritische condensatoren de middelen om twee gelijkstromen te verkrijgen die binnen de nauwste grenzen aan elkaar gelijk zijn. Het probleem is verlegd naar het openen en sluiten van elektronische schakelaars met een dutysycle van precies 50 %. Een digitaal probleem dat zonder moeilijkheden is op te lossen!

Met één DEM-schakeling kan men een stroom I omzetten in twee stromen I/2. Door diverse identieke schakelingen te cascaderen volgens figuur 5/7.5-13 kan men uit de ene basisstroombron I stromen genereren van I/2, I/4, I/8, enzoverder.



Figuur 5/7.5-13: Het cascaderen van DEM-schakelingen voor het genereren van stromen in een 1/2/4/8/16... verhouding.

Groot voordeel van de Philips-oplossing is dat de schakeling niet moet worden afgeregeld, omdat de reële waarde van de stroom van de stroombron immers niet belangrijk is.

De TDA1540 14 bit CD-DEM-DAC

Zoals reeds gezegd werd het principe van de "dynamic element matching" voor het eerst praktisch toegepast in de 14 bit DAC van het type TDA1540. Boze tongen bewe-

ren dat Philips met deze 14 bit op dat moment aan het einde van het technische latijn was en het CD-systeem dan ook een resolutie van 14 bit wilde geven. Onder druk van Sony die stelde "of een gezamenlijk 16 bit systeem of geen gezamenlijk systeem" zou Eindhoven gezwicht zijn. De allereerste Philips CD-spelers waren als gevolg hiervan uitgerust met een 14 bit omzetter, zodat de capaciteiten van het CD-systeem maar zeer ten dele werden uitgebuit.
Uiteraard is men er later in geslaagd ook 16 bit omzetters volgens het DEM-procédé te ontwikkelen!

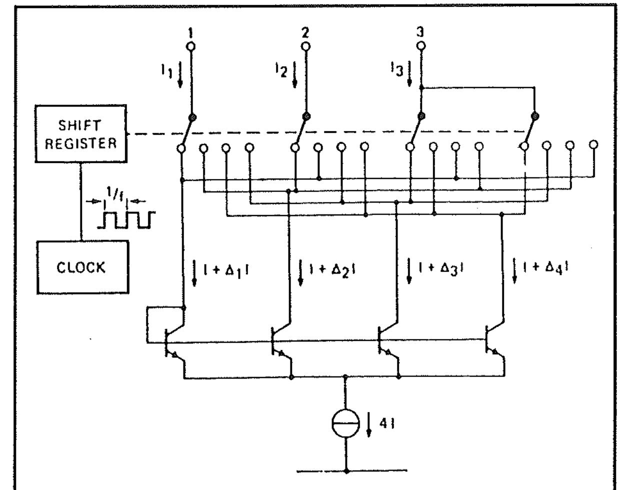
In de praktische DEM-schakelingen wordt het principe volgens figuur 5/7.5-14 verder uitgewerkt.
Een stroom 4.I wordt nu door een ingewikkelder schakelaarsysteem omgezet in drie stromen van respectievelijk 1.I, 1.I en 2.I. Een van de stromen 1.I wordt dan weer gebruikt als basis voor het volgende element uit de gecascadeerde keten, zodat stromen van 1/4.I, 1/4.I en 1/2.I ontstaan.

Figuur 5/7.5-15 geeft het volledige interne blokschema van deze speciaal voor CD-toepassingen ontwikkelde DAC.

In figuur 5/7.5-16 wordt, als slot van de bespreking van het DEM-systeem van Philips, een praktische omzetterschakeling met de TDA1540 gegeven. Merk op dat de digitale code in seriële vorm in het IC wordt ingelezen.

De Sony-oplossing of "de integrator-DAC met variabele pulssturing"

Ook bij Sony kwam men er al snel achter dat de traditionele stroombron-DAC's niet geschikt waren voor het veeleisende CD-systeem.

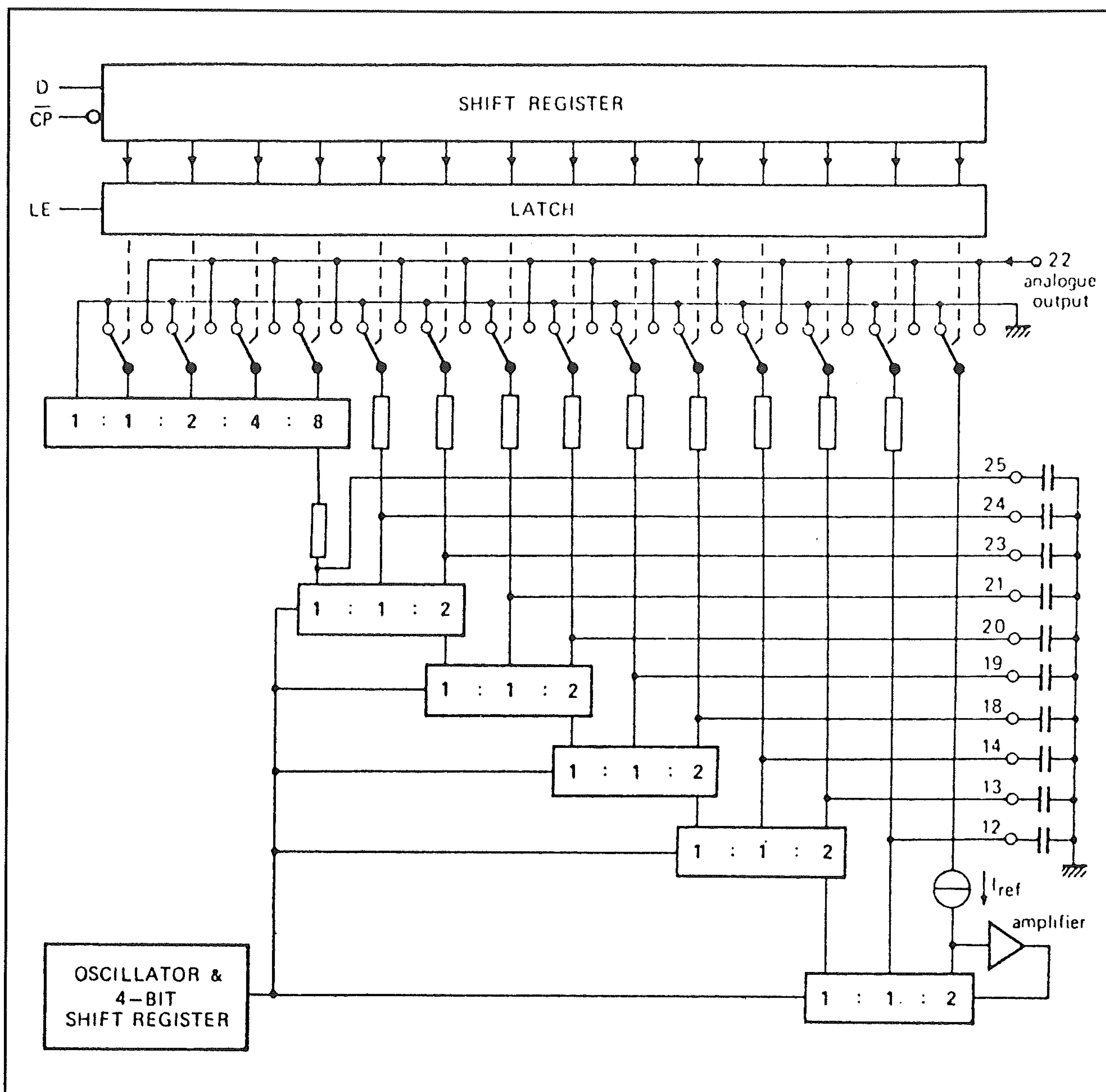


Figuur 5/7.5-14: Het DEM-basiselement van de TDA1540.

Men verzon echter een geheel andere oplossing dan Philips. Enig gemeenschappelijk punt is dat ook bij Sony wordt uitgegaan van één stroombron. Het basisprincipe van de "integrator-DAC met variabele pulsturing", voor de eenvoud toegepast op een 4 bit systeem, is getekend in figuur 5/7.5-17.

De stroombron I is via een elektronische schakelaar aangesloten op een integrator. Als een integrator gestuurd wordt met een constante stroom, dan zal de uitgangsspanning van de schakeling een lineair stijgende gelijkspanning zijn waarvan de stijgtijd evenredig is met de grootte van de constante stroom.
De binaire code op de ingangen wordt door een timer omgezet in een eenmalige pulstrein. Het aantal pulsjes in deze spanning is gelijk aan het binaire gewicht van de samenstelling van de digitale code. Als de code "L-L-L-L" is, dan levert de timer geen pulsjes.

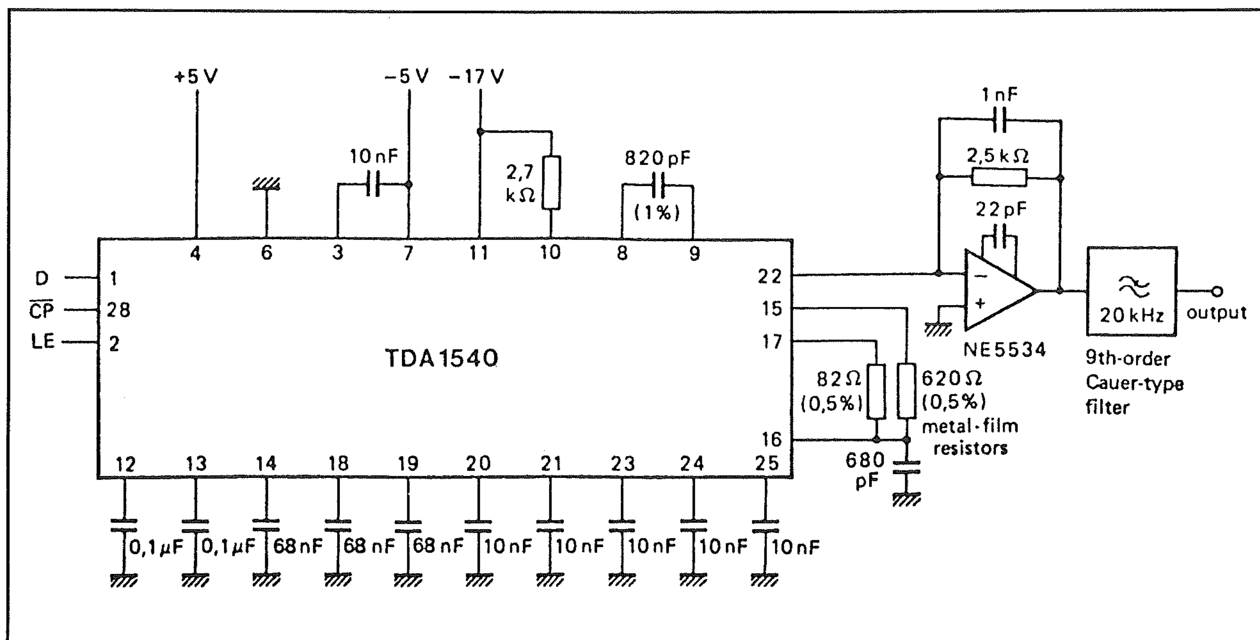
7.5 Signaalverwerking in de CD-speler



Figuur 5/7.5-15: Blokschema van de TDA1540.

Is de code gelijk aan "L-L-L-H", dan zal de timer een smal pulsje leveren dat de schakelaar even sluit. Is de code gelijk aan "H-H-H-H" dan levert de timer, zie figuur 5/7.5-18, een pulstrein die is samengesteld uit 15 pulsjes. De uitgangsspanning zal nu recht evenredig zijn met het aantal pulsjes in de pulstrein, daar zorgt de integrator wel voor. Zorgen 15 pulsjes voor een uitgangsspanning van 150 mV, dan zal een pulstrein met slechts 7 pulsjes een analoge uitgangsspanning van 70 mV tot gevolg hebben. Het analoge probleem van de nauwkeurigheid van de stroombron(nen) wordt ook nu handig omzeild en verlegd naar een digitaal probleem: zet de binaire code op de ingangen om in een pulstrein.

7.5 Signaalverwerking in de CD-speler

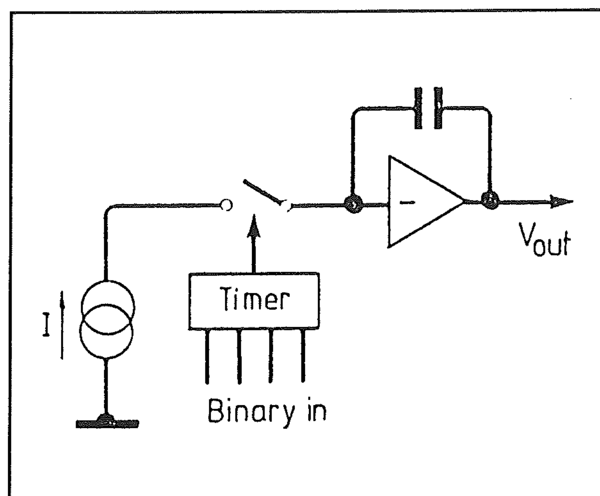


Figuur 5/7.5-16: Praktische schakeling rond de TDA1540 van Philips, basis van de analoge elektronica van de eerste generatie europese CD-spelers.

Een probleem dat zonder enige onnauwkeurigheid opgelost kan worden!
Op de uitgang verschijnt gedurende de conversie een zaagtandvormige spanning. Alleen de eindwaarde van deze zaagtand is echter van belang. Het zal duidelijk zijn dat het noodzakelijk is deze eindwaarde na het omzettingsproces te bewaren in een sample and hold schakeling. Nadat de volgende conversie voltooid is volstaat het de nieuwe topwaarde van de zaagtand weer in de S&H in te lezen. Op de uitgang van de S&H ontstaat een trapvormige spanning, waarbij iedere trapspanning overeen komt met het analoge equivalent van de digitale codes op de ingangen van de DAC.

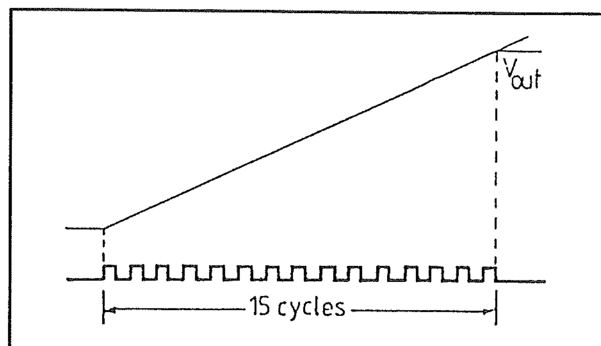
Dit proces is toegelicht in figuur 5/7.5-19.

Nadat de integrator de eindwaarde van de zaagtand heeft gegenereerd wordt door middel van de “RESAMPLE”-puls deze topwaarde via de RESAMPLE-schakelaar overgedragen naar de sample and hold schakeling. Nadien wordt een RESET-puls gegeven, die een schakelaar over de integrator-condensator sluit. De integrator gaat naar nul, de schakeling is klaar voor het verwerken van de volgende digitale audiocode.

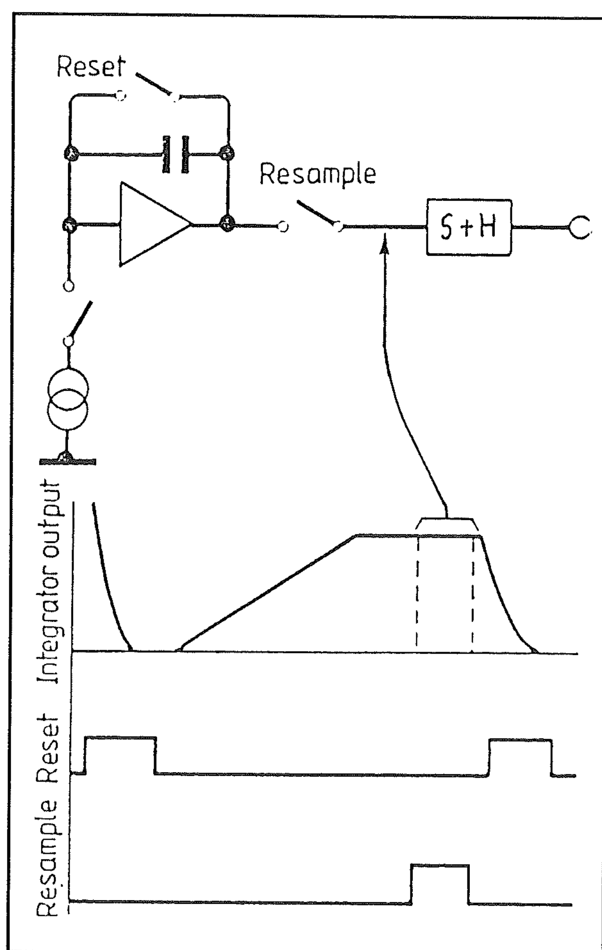


Figuur 5/7.5-17: Het basisprincipe van de DAC volgens het "integrator-procédé met pulssturing".

7.5 Signaalverwerking in de CD-speler



Figuur 5/7.5-18: De waarde van de analoge uitgangsspanning wordt bepaald door het aantal pulsjes dat de timer aan de schakelaar levert.



Figuur 5/7.5-19: De volledige digitaal naar analoog omzetting volgens het Sony-procédé.

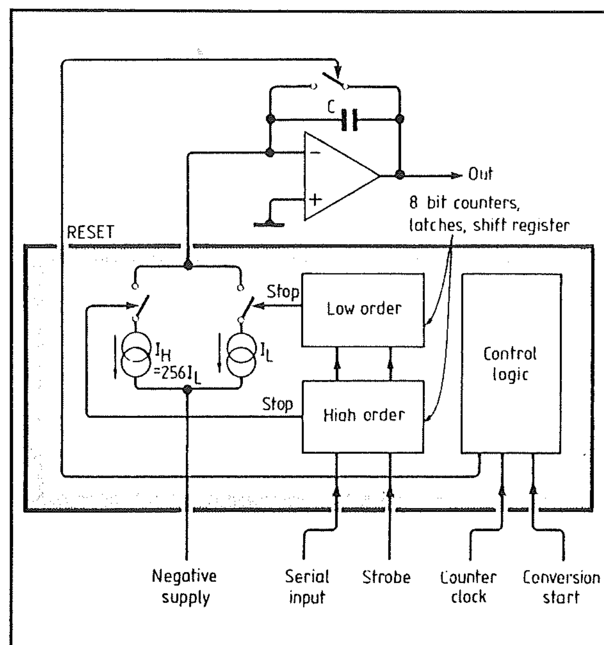
Enig bezwaar van de schakeling is dat de frequentie van de pulsjes uit de pulstrein gelijk moet zijn aan het aantal codecombinaties dat de digitale ingangscode kan bevatten, vermenigvuldigd met het aantal codecombinaties dat per seconde aan de DAC wordt aangelegd. Bij een 4 bit systeem zijn er maximaal 15 pulsjes per omzetting nodig en worden er 44.100 codes per seconde verwerkt. De pulsfrequentie bedraagt reeds 661,5 kHz. Bij een 16 bit systeem betekent een en ander dat de pulsfrequentie gelijk zou moeten zijn aan 2,9 GHz! Dat is uiteraard een frequentie die niet meer te verwerken valt in geïntegreerde schakelingen.

Praktische schakeling volgens het Sony-concept

Men heeft dit probleem opgelost door gebruik te maken van twee stroombronnen. Het blokschema van de CX20017, de eerste Sony CD-DAC die volgens het beschreven principe werkt, is getekend in figuur 5/7.5-20.

De twee stroombronnen genereren stromen in een zeer nauwkeurige verhouding van 1/256. Het zal duidelijk zijn dat één pulsje van de 256.I stroombron net zoveel effect heeft op de analoge uitgangsspanning als 256 pulsjes van de 1.I stroombron. Het gevolg is dat de pulsfrequentie kan dalen tot 11,289 MHz, een nog verwerkbare waarde. Het besturen van de twee stroombronnen is een digitaal probleem en kan dus zonder tolerantiefouten worden opgelost.
Omdat het systeem tussen twee conversies tijd nodig heeft om de eindwaarde van de zaagtand over te dragen naar de sample and hold, moet de klokfrequentie van de DAC echter hoger liggen dan de theoretische waarde van 11,289 MHz.

7.5 Signaalverwerking in de CD-speler



Figuur 5/7.5-20: Blokschema van de CX20017, de eerste door Sony speciaal voor CD-toepassingen ontwikkelde DAC.

Bovendien werd in de eerste generatie japanse CD-spelers slechts één DAC toegepast, die zowel de digitale code van het linker als van het rechter signaal moest verwerken.
Het gevolg was dat de klokfrequentie van de DAC moest opgevoerd worden tot 35 MHz.

Het door Sony ontwikkelde systeem is niet zo technisch volmaakt als het Philips systeem. Zwak punt is immers dat er twee stroombronnen noodzakelijk zijn en dat deze zeer precies op elkaar afgeregeld moeten worden. Gaat de 1/256-verhouding verloren, dan zal de DAC niet-monotoon gedrag gaan vertonen!
Voordeel is echter dat de schakeling absoluut geen last heeft van spikes, dit vanwege de integrator en de noodzakelijke sample and hold.

Theoretische problemen van het DAC-principe

Zelfs als men er in zou slagen een ideale DAC te ontwerpen, dan nog zouden er grote problemen op te lossen zijn bij het reconstrueren van een onvervormd audiosignaal uit de 16 bit brede audiocodes van de CD.
Deze problemen hebben te maken met de theoretische principes die ten grondslag liggen aan het gecombineerde ADC-DAC procédé.
Er zijn drie factoren te noemen:
- de digitale cross-over vervorming;
- de quantiseringsbandbreedte;
- de quantiseringsruis.

Deze drie factoren worden in de volgende drie paragrafen besproken.

De digitale cross-over vervorming

In principe wekt een digitaal naar analoog omzetter een unipolair uitgangssignaal op. Als de digitale ingangscode gelijk is aan "L-L-........-L-L" zal de uitgangsspanning 0 V bedragen. Is de digitale code gelijk aan "H-H-........-H-H" dan zal de analoge uitgangsspanning gelijk zijn aan een bepaalde maximale positieve waarde.

De audiosignalen die door het CD-systeem verwerkt worden zijn echter bipolair. Het geluidssignaal zal zowel positief als negatief zijn.
Dat heeft tot gevolg dat het volledige bereik van de ADC bij de opname moet opgesplitst worden in een positief deel en een even groot negatief deel. De nuldoorgang komt dan overeen met een code-overgang van "L-H-H-........-H-H" naar "H-L-........-L-L". Deze laatste digitale code zou men de "digitale massa" van het systeem kunnen noemen.
Men zou ook kunnen stellen dat de waarde van het MSB-bit de polariteit van het

analoge signaal bepaalt. Is dit negatief, dan is het MSB "L", is het signaal positief dan is het MSB "H".

Bij de reconstructie van het analoge signaal uit de digitale code in de CD-speler zal dezelfde situatie zich voor doen. Bij zeer kleine sinusoidaal verlopende analoge spanningen zullen alle bits van de code voortdurend gezamenlijk moeten omschakelen en wel op het moment dat het analoge signaal van polariteit wisselt. Juist op dat zeer kritische moment in het audiosignaal is de kans op "glitches" dus het grootst. Bovendien zal bij het omschakelen rond de analoge nul nu net het MSB, waarvan de convertorstroom het allernauwkeurigst moet zijn, een overheersende rol spelen. Zelfs de geringste afwijking in de stroomverhouding (en dus in de spanningsverhouding aan de uitgang van de DAC) heeft tot gevolg dat er ongewenste pieken op de analoge uitgangsspanning verschijnen.

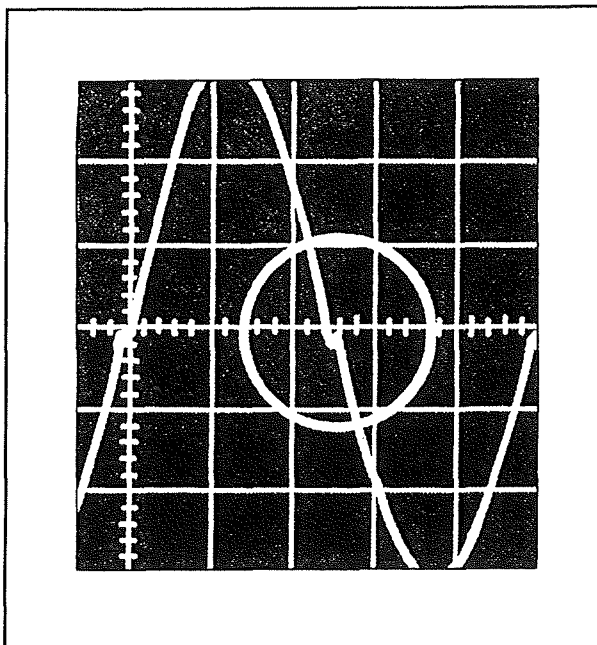
In figuur 5/7.5-21 wordt dit toegelicht aan de hand van een praktijksituatie. De foto toont de analoge uitgangsspanning van een 16 bit DAC die met codes wordt gestuurd die overeen komen met een zeer kleine sinusspanning. De vervorming die rond de nuldoorgang van het signaal ontstaat is enigszins te vergelijken met de vervorming die de allereerste generatie transistorversterkers ontsierde. Deze vervorming noemde men de "cross-over". Vanwege de analogie (niet in ontstaan, maar in hoorbaar effect) wordt dit verschijnsel bij het CD-systeem de "digitale cross-over" vervorming genoemd.

De quantiseringsbandbreedte

Als men een zuiver sinusoidaal verlopende analoge spanning digitaliseert en de digitale codes vervolgens weer omzet in een analoog signaal dan zal er, zie figuur 5/7.5-22, zelfs bij het beste systeem steeds een groot verschil bestaan tussen de ingangs- en de uitgangsspanning.

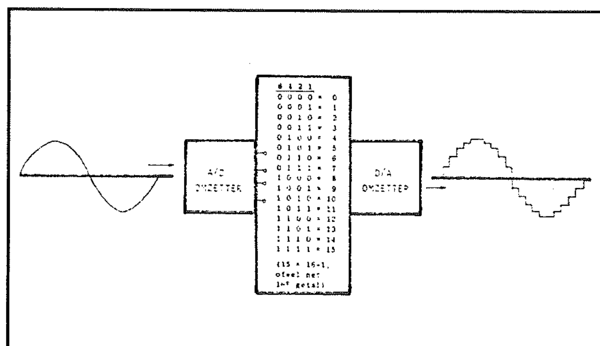
Het uitgangssignaal verloopt trapvormig en is dus geen zuivere sinus. Zoals ieder niet sinusoidaal verlopend signaal heeft ook dit signaal een bepaalde spectrale inhoud, rechtstreeks gevolg van de universele theorie van Fourier.

Als men aan de ingang van zo'n ADC-DAC systeem een analoog signaal zou leggen met een bandbreedte van 20 kHz, bijvoorbeeld witte ruis, dan zou het frequentiespectrum van het herwonnen audiosignaal er uitzien zoals getekend in figuur 5/7.5-23.

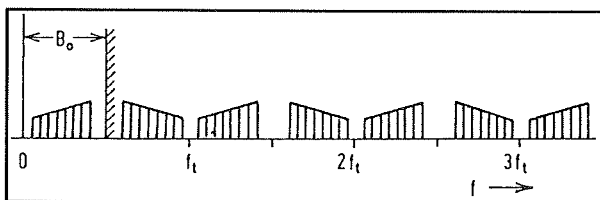


Figuur 5/7.5-21: Digitale cross-over vervorming ontstaat als gevolg van het voortdurend omschakelen van het MSB als de spanning van polariteit wisselt.

7.5 Signaalverwerking in de CD-speler



Figuur 5/7.5-22: Fundamentele eigenschap van ieder ADC-DAC systeem is dat de teruggewonnen uitgangsspanning trapvormig verloopt.



Figuur 5/7.5-23: Frequentiespectrum van een gedigitaliseerd en nadien herwonnen audiosignaal met een bandbreedte van 20 kHz.

In theorie ontstaan dan een oneindig aantal harmonische groepen rond de veelvouden van de samplefrequentie, ieder voorzien van 20 kHz brede symmetrische zijbanden. Bij het CD-systeem bedraagt de samplefrequentie 44,1 kHz. De eerste harmonische groep ligt dus rond deze waarde (f_t in de tekening). Maar 44,1 kHz - 20 kHz is echter 24,1 kHz! De laagste harmonische van de linker zijband van deze eerste groep ligt dus slechts 4,1 kHz boven 20 kHz bandbreedte van het CD-systeem!

Het zal duidelijk zijn dat al deze harmonischen uit het uitgangssignaal van de DAC gefilterd moeten worden. Weliswaar zijn deze frequenties niet hoorbaar, maar zij kunnen in de op de CD-speler aangesloten eindversterker voor grote problemen zorgen. Zou deze versterker immers last hebben van intermodulatievervorming, dan zouden allerlei som- en verschilfrequenties ontstaan die wel degelijk binnen de hoorbare band vallen. Het geluid zou ernstig vervormd klinken.

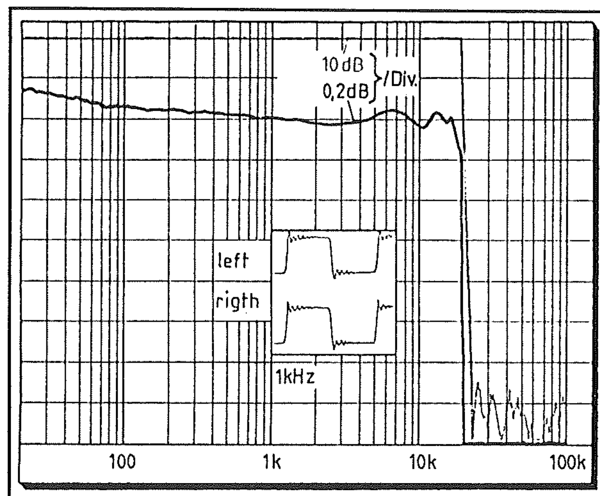
Vandaar dat de eis gesteld wordt dat alle harmonischen die in het uitgangssignaal van de DAC zitten en frequenties hebben boven de 20 kHz minstens met 50 dB verzwakt moeten worden. Op zich zijn er talrijke analoge filterschakelingen te verzinnen die signalen boven de 20 kHz met het genoemde aantal dB kunnen verzwakken. Het probleem ontstaat echter door het feit dat het eerste met 50 dB te verzwakken signaal een frequentie heeft van 24,1 kHz.

Er moeten dus zeer steile filters toegepast worden. Meestal gebruikt men een Chebyshew-filter van de negende of zelfs de elfde orde. Zoals uit de karakteristiek van figuur 5/7.5-24 blijkt heeft zo'n filter een uitstekende amplitudegrafiek. De fasekarakteristiek is echter waardeloos. Door groeptijdverschillen in de audioband tot 20 kHz zullen er opslingeringen ontstaan als het audiosignaal pulsvormig verloopt. Deze opslingeringen zijn erg goed te horen en veroorzaken een typische vervorming.

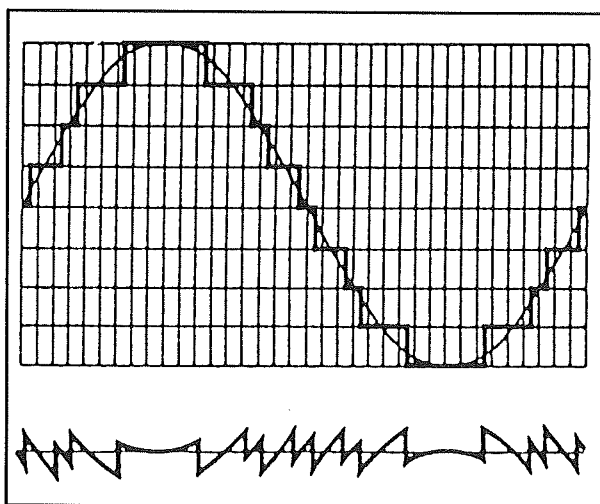
De quantiseringsruis

De quantiseringsruis is een rechtstreeks gevolg van het stapvormige verloop van de uitgangsspanning van een DAC. Als men de in- en de uitgangsspanning van het systeem van figuur 5/7.5-22 van elkaar zou aftrekken dan zou er een verschilsignaal ontstaan dat er uitziet zoals getekend in de onderste grafiek van figuur 5/7.5-25.

7.5 Signaalverwerking in de CD-speler



Figuur 5/7.5-24: Amplitudekarakteristiek van een elfde orde laagdoorlaatfilter met de gevolgen van de fasekarakteristiek op de weergave van pulsvormig verlopende audiosignalen.



Figuur 5/7.5-25: Het ontstaan van de quantiseringsruis als gevolg van het verschillend verloop van de in- en de uitgangsspanning van een ADC-DAC systeem.

Dit verschilsignaal heeft ruisachtige eigenschappen en uit zich ook als dusdanig. Bij analyse van het frequentiespectrum van dit signaal blijkt dat er componenten in de volledige audioband aanwezig zijn! Het zal duidelijk zijn dat de grootte van deze quantiseringsruis afhankelijk is van het aantal bits waarmee de digitaal naar analoog omzetter werkt. Hoe meer bits ter beschikking zijn, hoe dichter de trapjes bij elkaar kunnen liggen en hoe kleiner het verschilsignaal zal zijn.

Men kan de theoretische waarde van deze quantiseringsruis berekenen. Voor een 16 bit systeem ligt deze ruis 96 dB onder het maximale signaal. Vandaar dat steeds gesteld wordt dat het CD-systeem een signaal/ruis verhouding van 96 dB heeft. De ruis neemt toe met 6 dB per bit naarmate de DAC minder bits van de audiocode verwerkt. Een 14 bit systeem heeft dus een maximale signaal/ruis verhouding van 84 dB.

Het zal duidelijk zijn dat de basisfrequentie van de quantiseringsruis gelijk is aan de bemonsteringssnelheid van het systeem. Bij het CD-systeem ligt deze basisfrequentie dus bij 44,1 kHz.

Upsampling

Inleiding

Van de twaalf in het vorige subkopje opgesomde DAC-systemen zijn er niet minder dan vijf waarin het woord “upsampling” voorkomt. Upsampling moet dus wel een belangrijk principe zijn in de CD-technologie. Dat is het ook, de meeste moderne CD-spelers werken allemaal met dit principe.

Opgemerkt moet worden dat vaak gebruik wordt gemaakt van de ons inziens

7.5 Signaalverwerking in de CD-speler

verkeerde term "oversampling". De term upsampling beschrijft veel beter het proces dat wordt uitgevoerd dan de term oversampling.

Alvorens uitgelegd kan worden wat dit alles nu precies voorstelt is het nuttig nog eens in het kort de belangrijkste beperkingen van het DAC-procédé op een rijtje te zetten.

- De nauwkeurigheid van de DAC
  Aan 16 bit brede DAC's worden zo'n hoge eisen gesteld wat betreft de nauwkeurigheid van de stroombronnen dat mensen die beweren te weten waarover zij praten stellig verkondigen dat er op dit moment nog steeds geen enkele 16-bitter op de markt is die dat predicaat echt waar maakt. De schakelingen verwerken wel alle 16 bits van de audiocode, maar de nauwkeurigheid van de omzetting komt vaak niet verder dan 14 bit of in het gunstigste geval 14,5 bit.
- De quantiseringsbandbreedte
  De relatief lage samplingfrequentie van 44,1 kHz heeft tot gevolg dat er maar 4,1 kHz zit tussen de hoogste signaalfrequentie van 20 kHz en de eerste te verwijderen harmonische. Dat stelt hoge eisen aan de ontwerpers van de analoge filters en zorgt er in ieder geval voor dat de pulsweergave van de CD-speler slechts is.
- De quantiseringsruis
  Het totale ruisvermogen zit, bij een samplingfrequentie van 44,1 kHz, grotendeels verspreid over een bandbreedte tussen de 0 en de 44,1 kHz. Een niet onaanzienlijk deel van dit ruisvermogen valt dus in de hoorbare band.

Verhogen samplingfrequentie
Als al deze problemen op een rijtje worden gezet blijkt dat de lage samplingfrequentie van 44,1 kHz eigenlijk de meeste problemen veroorzaakt. Als deze frequentie verdubbeld zou kunnen worden tot 88,2 kHz zou het vermogen van de quantiseringsruis over een groter frequentiegebied verspreid worden waardoor er minder energie in de 0 tot 20 kHz band zou overblijven. Bovendien zou de quantiseringsbandbreedte er heel anders komen uit te zien!

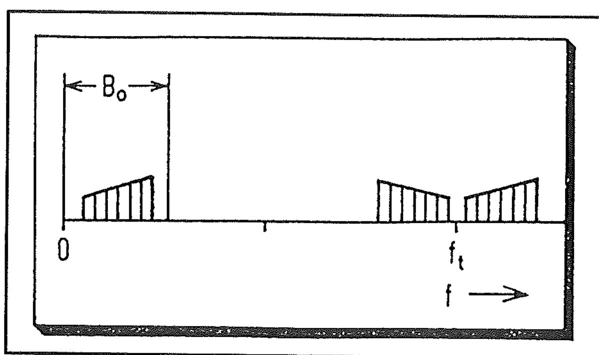
Overbemonstering of upsampling
Nu werkt het CD-systeem met een bemonsteringsfrequentie van slechts 44,1 kHz! Zou men willen overschakelen naar de dubbele frequentie, dan moeten extra monsters kunstmatig worden tussengevoegd tussen de 44100 16 bit monsters die de digitale schakeling per seconde aflevert.
Dat proces noemt men in het algemeen upsampling of in het nederlands overbemonstering. Het zal wel duidelijk zijn dat met dual upsampling het proces wordt aangegeven waarbij de samplingfrequentie wordt verhoogd van 44,1 tot 88,2 kHz.

Dat lijkt een onmogelijke opgave, maar zoals zo vaak blijkt ook nu weer dat digitaal alles kan! Men is er in geslaagd digitale schakelingen te ontwerpen, de zogenaamde digitale transversaal filters, die dat kunststukje voor elkaar brengen.

Maar er is meer! Toen men toch eenmaal bezig was met het ontwerpen van dat soort schakelingen kwam men tot de ontdekking dat het net zo eenvoudig mogelijk was de samplingfrequentie te verviervoudigen. De samplingfrequentie van de DAC wordt dan 176,4 kHz en er moeten drie monsters tussen iedere twee monsters die de digitale schakeling levert worden tussengevoegd.

De effecten van upsampling op de quantiseringsbandbreedte

Het effect van dual of quadruple upsampling op de bandbreedte van het herwonnen signaal kan het best grafisch verklaard worden.
De quantiseringsbandbreedte van een met een bemonsteringssnelheid van 88,2 kHz herwonnen signaal is getekend in de grafiek in figuur 5/7.5-26.



Figuur 5/7.5-26: De quantiseringsbandbreedte bij een samplingfrequentie van 88,2 kHz.

De eerste bundel harmonischen ligt nu rond de 88,2 kHz zodat de laagste harmonische een freqentie heeft van 68,2 kHz. Er zit dus nu een frequentieverschil van 48,2 kHz tussen de maximale frequentie van het signaal en deze eerste te verwijderen harmonische. Het gevolg is dat de analoge filterschakeling van een heel wat lagere orde kan zijn en de fasekarakteristiek van zo'n filter is heel wat beter te manipuleren dan deze van een elfde orde filter.

Het voordeel van quadruple upsamplen blijkt duidelijk als men het frequentiespectrum van zo'n signaal beschouwt. Dat is getekend in figuur 5/7.5-27.

Het zal duidelijk zijn dat er nu helemaal geen problemen meer bestaan bij het ontwerpen van het analoge filter. De afstand tussen de 20 kHz en de eerste harmonische is nu zo groot dat zelfs het meest eenvoudige derde orde actieve Besselfilter goed genoeg is.

Om dat toe te lichten is in figuur 5/7.5-28 het praktische schema van het analoge filter getekend, dat Philips toepast in zijn viervoudig overbemonsterde CD-spelers.

De effecten van het upsamplen op de quantiseringsruis

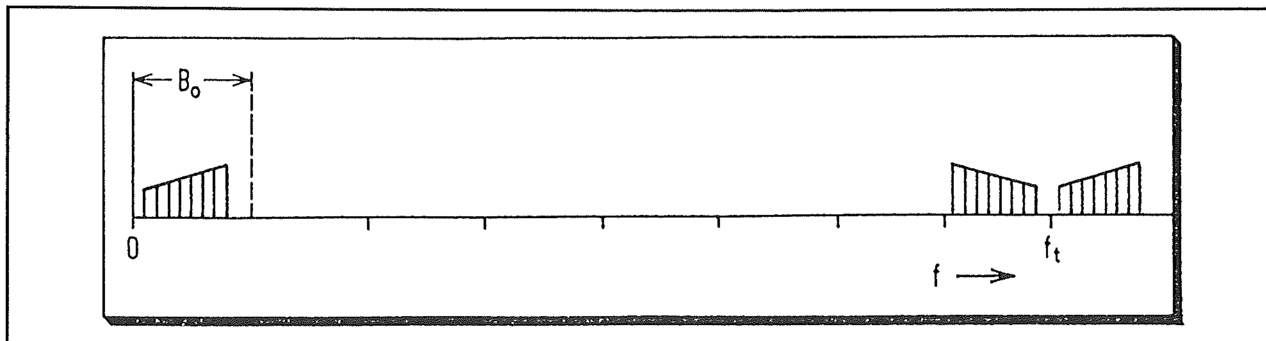
Een tweede voordeel van het verhogen van de samplefrequentie van de DAC is dat de quantiseringsruis over een groter frequentiegebied wordt verspreid en het aandeel in de 0 tot 20 kHz band lager wordt.

Een en ander wordt grafisch toegelicht aan de hand van figuur 5/7.5-29.

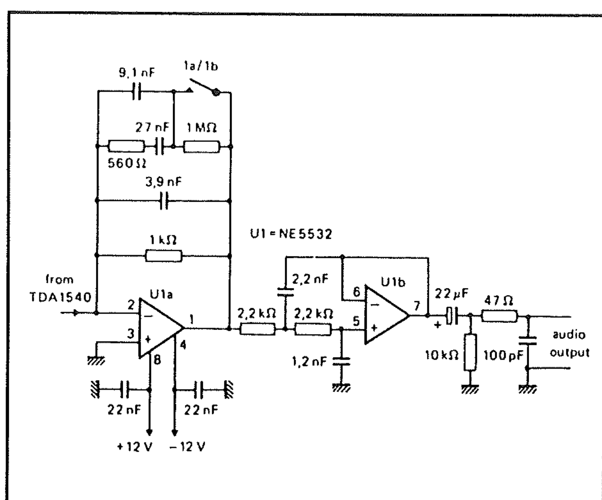
Links is het reeds bekende plaatje getekend van de grootte van de quantiseringsruis bij normale sampling.
Als men echter gaat upsamplen zal één periode van het oorspronkelijke signaal vaker worden omgezet in een analoge trapspanning.
In de veronderstelling dat de kunstmatig tussengevoegde monsters goed berekend zijn zal de trapspanning de vorm van het originele audiosignaal bovendien beter benaderen.
Beide gegevens hebben tot resultaat dat de quantiseringsruis kleiner is en bovendien een hogere basisfrequentie heeft, zie de rechter figuur.

Het praktische gevolg is dat er veel minder ruisvermogen in de band tussen 0 en 20 kHz gaat zitten en de vervorming van het signaal kleiner wordt.

7.5 Signaalverwerking in de CD-speler



Figuur 5/7.5-27: Het frequentiespectrum van een viervoudig overbemonsterd signaal.



Figuur 5/7.5-28: Het analoge derde orde Bessel-filter dat achter een viervoudig overbemonsterde DAC geschakeld kan worden.

Het lijkt logisch te veronderstellen dat bij dual upsampling het digitaal transversaal filter de waarde van sample n en sample n+1 bepaalt, de gemiddelde waarde berekent, deze gemiddelde waarde weer omzet in een 16 bit brede digitale code en dit nieuwe kunstmatig gegenereerde sample tussen de samples n en n+1 voegt.
Het principe van upsamplen zou dan overeen komen met het kunstmatig invoegen van niet uit te lezen codes in de digitale schakeling.

Voor een quadruple systeem zou het filter dan drie tussensamples moeten berekenen.

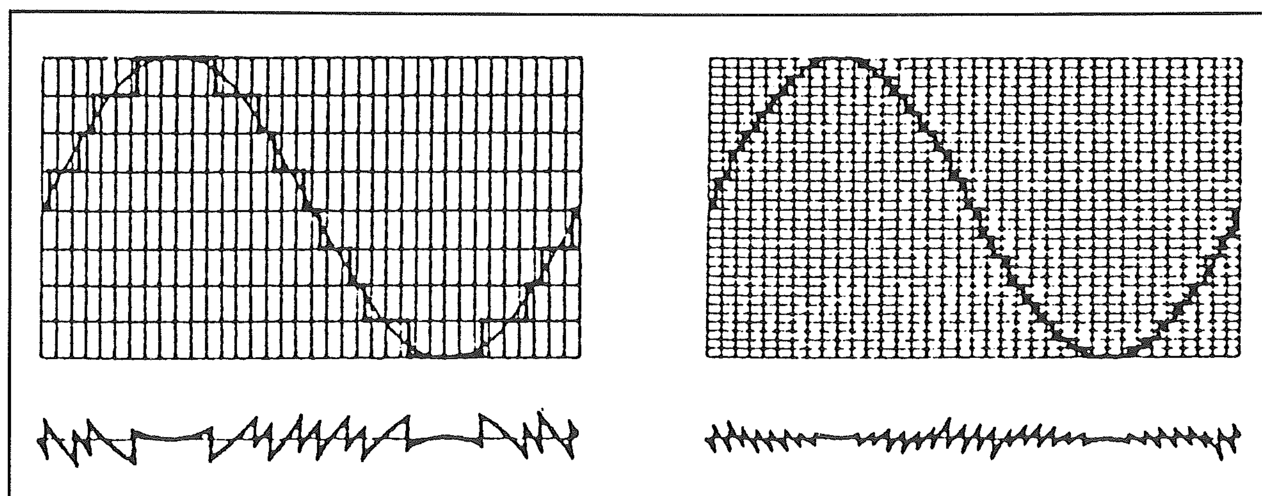
Niets is echter minder waar!
De werking van een digitaal transversaal filter (DTF) is erg moeilijk te doorgronden zonder diepgaande kennis van fundamentele theoretisch/wiskundige elektronica en met name van de tijd- en frequentie-domein theorieën.
Laat ons toch een poging wagen!

Een digitaal transversaal filter heeft, wel beschouwd, hetzelfde effect op het uiteindelijke analoge signaal als een analoog laagdoorlaatfilter. De ruis wordt verminderd en door de werking van het DTF kan het analoge filter veel minder verzwakken. Het lijkt dus net alsof het DTF als eerste en voornaamste laagdoorlaatfilter kan opgevat worden en dat de werking ervan alleen nog iets moet aangevuld worden door het tweede analoge filter.

Als een DTF als laagdoorlaatfilter werkt, dan moet het ook aan dezelfde wetten gehoorzamen als een traditioneel analoog filter.

De digitale schakelingen leveren 16 bit brede woorden, de digitale representanten van analoge spanningen.

7.5 Signaalverwerking in de CD-speler



Figuur 5/7.5-29: Vergelijking van de quantiseringsruis bij normale sampling en upsampling.

Vanwege het discontinue karakter van de code (deze verandert immers 44.100 keer per seconde plotseling van waarde) kan men de ingangsspanning van het DTF voorstellen als een opeenvolging van smalle, steile pulsjes.

De pulsweergave van filters

Het volgende probleem dat dus opgelost moet worden is hoe een analoog laagdoorlaatfilter reageert als er op de ingang een smalle, steile puls wordt aangelegd. Dat is een vanouds bekend probleem uit de analoge elektronica, een probleem dat al lang geleden volledig wiskundig werd opgelost.
De pulsweergave van een analoog laagdoorlaatfilter is getekend in figuur 5/7.5-30.

Er bestaat een ondubbelzinnig verband tussen het amplitudeverloop aan de uitgang, de amplitude van de ingangspuls en het tijdsverloop. Het amplitudeverloop kan volledig wiskundig worden uitgedrukt. Voor ieder punt op de tijdsas kan dus een constante factor of coëfficiënt k worden berekend die, vermenigvuldigd met de amplitude van de ingangspuls, de amplitude van de uitgangsspanning geeft voor het specifieke punt op de tijdsas.

Het verloop van de uitgangsspanning kan dus worden gedefinieerd door het berekenen van een aantal coëfficiënten $k(t_n)$, die ieder de amplitude van het uitgangssignaal definiëren op het tijdstip t_n. Hoe meer coëfficiënten berekend worden, hoe nauwkeuriger de uitgangsspanning van het analoge filter kan worden gereconstrueerd!

Wat het digitaal transversaal filter nu doet is niets anders dan de amplitude van het ingangssample vermenigvuldigen met bepaalde coëfficiënten, die de amplituden bepalen van imaginaire nieuwe samples ergens op de tijdsas. Op deze manier worden extra samples berekend, die tot gevolg hebben dat de amplitudekarakteristiek van het digitale filter voldoet aan het beeld van figuur 5/7.5-30.
Helaas wordt de zaak tamelijk gecompliceerd doordat de ingangssamples elkaar in een snel tempo opvolgen en de uitgangsresponses van het filter op deze samples elkaar overlappen. Dat is een gevolg van de filtervertraging.

7.5 Signaalverwerking in de CD-speler

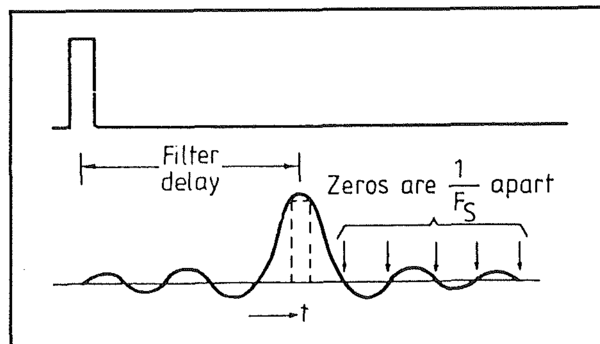
Toch kan deze hele ingewikkelde materie nog steeds ondubbelzinnig is wiskundige formules worden vast gelegd. Bij het bepalen van de coëfficiënten moet men nu dus niet alleen rekening houden met de respons van het filter op één ingangssample, maar ook het overlappende effect van de verschillende responses op opeenvolgende samples incalculeren.

Het zal duidelijk zijn dat het digitaal transversaal filter op een en hetzelfde moment toegang moet hebben tot opeenvolgende samples, wil de berekening van het product van de coëfficiënten met de amplitude van de samples uitgevoerd kunnen worden.

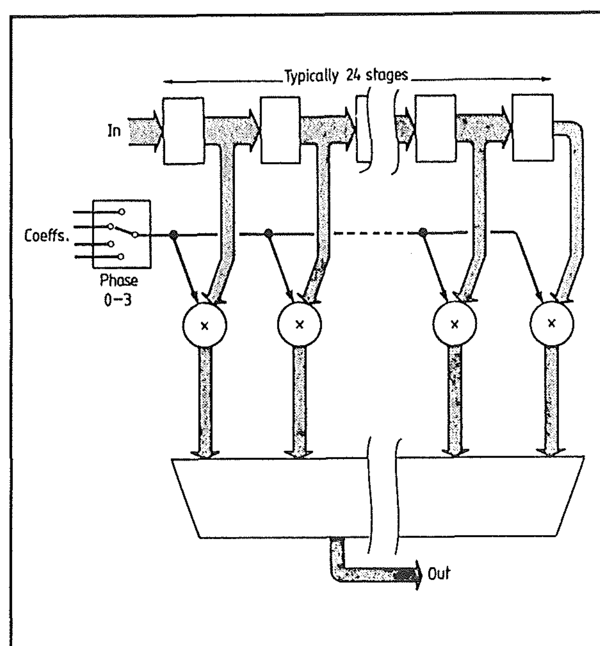
Vandaar dat een digitaal transversaal filter steeds is opgebouwd volgens het principiële blokschema van figuur 5/7.5-31.

De 16 bit brede digitale monsters die van de digitale elektronica komen worden ingelezen in een schuifregister. Dat schuifregister kan opgevat worden als de tijdsas uit figuur 5/7.5-30.
Een digitaal monster dat op een bepaald tijdstip wordt ingelezen zal immers enige tijd later doorgeschoven zijn naar het midden van het register. Het schuifregister heeft aftakkingen die naar binaire vermenigvuldigers gaan. In deze trappen wordt de waarde van de monsters vermenigvuldigd met de reeds genoemde coëfficiënten. Terwijl een sample door het register schuift wordt na iedere verplaatsing de waarde van het monster met een nieuwe coëfficiënt vermenigvuldigd. Op deze manier wordt de respons van een analoog filter nagebootst.

Al deze berekende nieuwe waarden gaan naar een soort van mengschakeling.



Figuur 5/7.5-30: De reactie van een laagdoorlaatfilter op een smalle puls op de ingang.



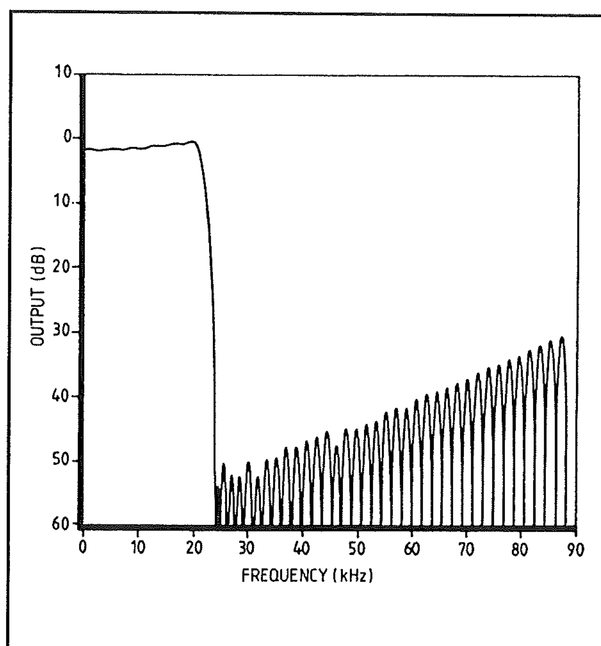
Figuur 5/7.5-31: De principiële samenstelling van een digitaal transversaal filter.

Daar wordt het effect van de overlapping ingecalculeerd en wordt de nieuwe monsterstroom samengesteld.

Bij een systeem dat werkt met 14 bit brede DAC's zal de nieuwe monsterstroom bestaan uit 14 bit brede monsters, die met de dubbele of de vierdubbele frequentie worden uitgevoerd.

De karakteristieken van een digitaal transversaal filter

Een DTF is dus een echt laagdoorlaatfilter. Als dusdanig heeft een dergelijke schakeling dan ook een amplitude/frequentiekarakteristiek. In figuur 5/7.5-32 wordt deze karakteristiek gegeven voor het DTF van het type SAA7220 dat door Philips werd ontwikkeld.

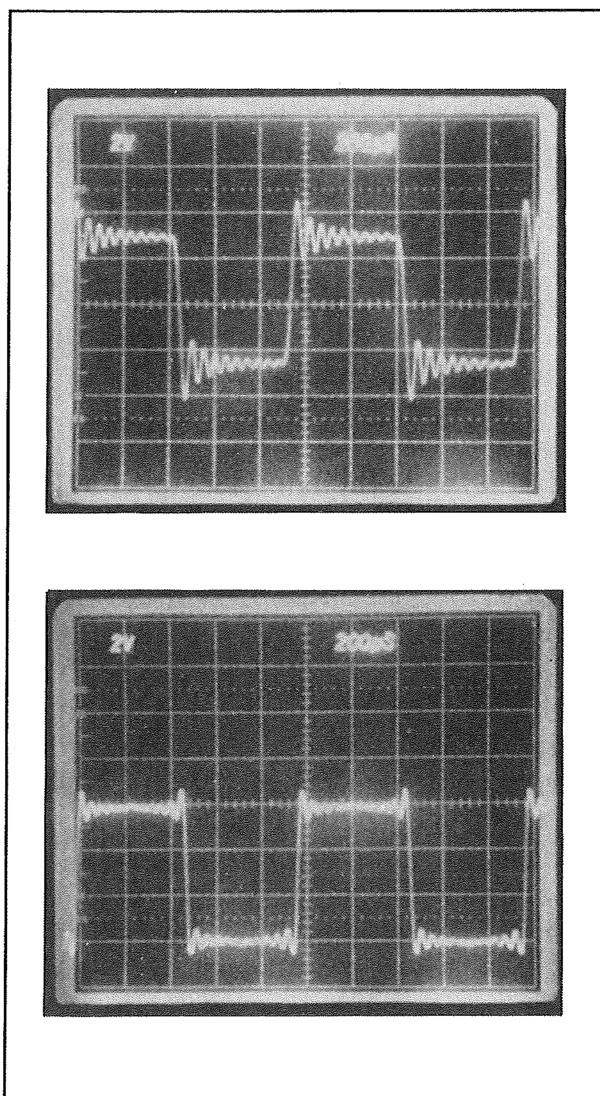


Figuur 5/7.5-32: De amplitudekarakteristiek van het digitaal transversaal filter SAA7220 van Philips.

Deze karakteristiek is zo goed als ideaal. De kleine rimpel in de doorlaatband wordt veroorzaakt door afrondingsfouten in de waarde van de toegepaste filtercoëfficiënten.

De nauwkeurigheid van het filter hangt af van de lengte van het interne schuifregister. Hoe langer dit is, hoe langer een digitaal monster in het filter blijft en hoe meer amplitudecoëfficiënten berekend kunnen worden!

Ook wat betreft looptijdverschillen en faseverschuivingen is een digitaal transversaal filter veel beter dan een analoog filter van een hoge orde. Ter illustratie worden in figuur 5/7.5-33 twee weergaven van een vierkantsgolf met een frequentie van 1 kHz met elkaar vergeleken. De bovenste schermbeeldfoto geeft de weergave van een elfde orde analoog filter, de onderste deze van een digitaal transversaal filter. Kommentaar overbodig!



Figuur 5/7.5-33: Vergelijking van de pulsweergave van een elfde orde analoog filter (boven) en een digitaal transversaal filter (onder).

De belangrijkste DAC-systemen

Inleiding
Nu voldoende achtergrondinformatie is gegeven over de problemen die ontstaan bij het omzetten van digitale codes in audiosignalen en de theoretische oplossingen zijn besproken, kunnen de verschillende DAC-systemen die in CD-spelers worden toegepast in de meeste gevallen zeer kort worden besproken.
Daarop zijn twee uitzonderingen. Sinds kort verlaten enige fabrikanten de tot nu toe besproken principes en gaan volledig nieuwe technieken gebruiken. Dat zijn de omzetters die werken met behulp van pulsbreedte modulatie (Japan) en de één bit brede omzetters die door Philips zijn ontwikkeld. Deze twee technieken komen aan het slot van dit subkopje nog even uitvoerig aan de orde.

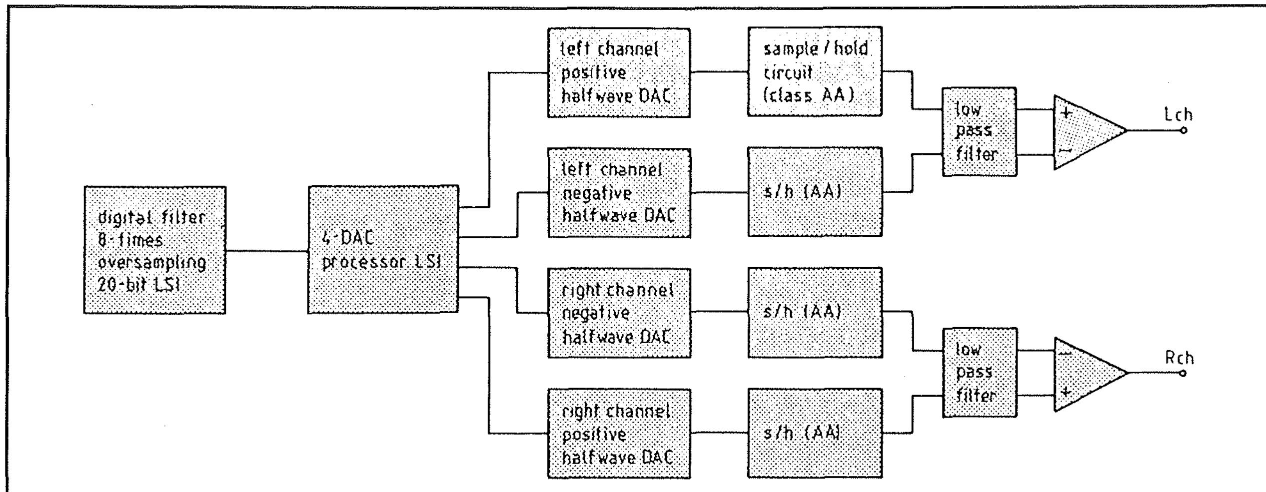
14 bit switched real sampling
De naam zegt reeds hoe deze CD-spelers werken. De digitale monsters worden rechtstreeks verwerkt, dus zonder upsampling. Er wordt gebruik gemaakt van één 14 bit brede DAC, de twee laagste informatiebits worden dus niet geëvalueerd.
Met opzet wordt gesproken van één DAC! In deze CD-spelers van de allereerste generatie (men treft deze techniek tegenwoordig ook nog wel aan in de allernieuwste zeer goedkope draagbare CD-spelers!) is inderdaad slechts één DAC aanwezig.
De twee monsters van het linker en rechter signaal worden door middel van elektronische schakelaars om en om aan de ingangen van de DAC aangeboden.
Het gevolg is dat er een vertraging van 11,3 µs ontstaat tussen het linker en rechter geluidssignaal. In de vakliteratuur zijn vele esotherische discussies gevoerd over de hoorbare effecten van deze vertraging. Feit is dat deze vertraging ook al ontstaat als een van de luidsprekers 3,5 mm verder of dichter bij het oor van de luisteraar staat dan de andere! Puristen die kritiek hebben op dit systeem moeten dus vanaf nu verplicht worden gesteld alleen naar muziek te luisteren met hun hoofd vast in een bankschroef geklemd! Het zal duidelijk zijn dat dit onderdelen besparende systeem vooral door Sony-georiënteerde fabrikanten werd en wordt toegepast. De Sony DAC's volgens het variabele pulsprincipe hebben ingebouwde sample and hold's en vandaar dat het heen en weer schakelen van de ingangen tussen links en rechts geen problemen aan de analoge uitgangen oplevert.
Er wordt alleen analoog gefilterd, met alle bezwaren die aan dit principe eigen zijn.

14 bit real sampling
Bij dit systeem worden de digitale monsters rechtstreeks aan twee 14 bit brede DAC's aangeboden. De twee laagste bits worden niet in de omzetting betrokken, de signaal/ruis verhouding voldoet dus niet aan de CD-standaard. Het filteren is in handen van analoge schakelingen.

16 bit switched real sampling
Werkt hetzelfde als het 14 bit soortgelijke systeem, maar nu uiteraard met 16 bit brede DAC's.

16 bit real sampling
Nu worden alle 16 bits van de CD-code betrokken bij de digitaal naar analoog omzetting. Ook nu worden echter alleen analoge filters gebruikt.

7.5 Signaalverwerking in de CD-speler



Figuur 5/7.5-34: Het principe van het gecascadeerd samplen.

16 bit cascaded real sampling

In het vorige subkopje werd gesteld dat een van de problemen van het omzettingsproces is dat de MSB omschakelt bij de nuldoorgang van het audiosignaal. Daardoor kan digitale cross-over vervorming ontstaan.
Er zijn verschillende systemen ontwikkeld om dit probleem op te lossen.

Philips gebruikt een techniek die overeen komt met het verschuiven van het nulpunt. In het digitaal transversaal filter van het type SAA7220P wordt het digitale nulpunt ingesteld op de code "H-L-L-L-L-L-L-L-L-H-L-L-L-L-L". Omgerekend naar begrijpelijke analoge waarden komt dit overeen met een signaalamplitude van -63 dB. Het gevolg is dat voor kleine signalen het problematisch omschakelen van het MSB wordt vermeden. Het bezwaar van dit procédé is uiteraard dat de omzetter nu niet geheel symmetrisch kan werken. Het positieve bereik is kleiner dan het negatieve. Om vastlopen tegen het positieve maximum te voorkomen wordt in het digitale filter een vorm van "downscaling" toegepast. Als het momentele geluidsniveau de positieve grenzen van het systeem met verschoven nulpunt zou overschrijden, dan wordt er wat gewijzigd in de digitale code van het monster zodat oversturing van de DAC wordt vermeden.

Voornamelijk japanse fabrikanten passen een geheel andere benadering toe voor het vermijden van de digitale cross-over vervorming. Deze techniek staat bekend als gecascadeerd samplen. Het blokschema van dit procédé is getekend in figuur 5/7.5-34.
Het digitale filter splitst de audiomonsters in positieve en negatieve. Dat gaat erg eenvoudig, omdat de waarde van het MSB een maat is voor het positieve of negatieve karakter van het monster. Deze twee monsterstromen worden ieder aan eigen digitaal naar analoog omzetters aangeboden. In totaal zijn er dus vier DAC's nodig, vandaar dat dit soort apparaten op het frontpaneel vaak wordt gekenmerkt met de kreet "4-DAC". De DAC's werken enkelzijdig hetgeen betekent dat zij doen waarvoor zij zijn ontworpen: het omzetten van digitale codes in unipolaire analoge uitgangssignalen.
Na filtering worden de positieve en negatieve signaalhelften gemengd in een ope-

rationele versterker. Hier zit echter het zwakke punt van dit procédé. Als deze op-amp een offset heeft, dan ontstaat er rond de nul weer een niveauverschuiving en is er toch weer sprake van cross-over vervorming! Weliswaar kan de offset van een operationele versterker weggetrimd worden en zijn er speciale schakelingen op de markt met offsetspanningen in het µV-bereik, maar toch blijft de vraag bestaan of het middel niet erger is dan de kwaal. Offsetverschijnselen zijn immers zeer afhankelijk van de temperatuur, hetgeen van digitale cross-over vervorming niet gezegd kan worden!

14 bit dual upsampling
Bij deze CD-spelers wordt de samplingfrequentie verdubbeld tot 88,2 kHz en de monsterstroom aan twee 14 bit brede DAC's aangeboden. Gefilterd wordt meestal met analoge filters van de vijfde orde.

16 bit dual upsampling
Hetzelfde procédé, maar nu uiteraard met 16 bit omzetters. Zoals reeds opgemerkt worden door verschillende onafhankelijke onderzoekers grote vraagtekens gezet achter de beweringen van de fabrikanten dat hun 16-bitters echt als dusdanig werken.
Vaak treft men niet-monotoon gedrag aan, zodat er eerder sprake is van verbeterde 14-bitters met een echte resolutie van 14,5 of 15 bit.

14 bit quadruple upsampling
Het digitaal transversaal filter zet ieder binnenkomend digitaal monster om in vier 14 bit brede monsters, die nadien door snelle 14 bit omzetters met een samplingfrequentie van 176,4 kHz in analoge signalen worden omgezet. Als analoog filter kan een zwak derde orde filter worden gebruikt.

16 bit quadruple upsampling
Van hetzelfde laken een pak, maar nu met 16 bitters. Behalve de vraagtekens bij de resolutie van deze omzetters moet men nu ook kritische kanttekeningen plaatsen bij de verwerkingssnelheid van de DAC's. De vraag is of de glitches die bij deze snelheid onvermijdelijk op het analoge uitgangssignaal ontstaan wel voldoende weggefilterd kunnen worden.

Adaptive floating decimal upsampling
Aan dit procédé gaat een zeer interessante gedachtengang vooraf. Compact disks hebben een onvoorstelbaar groot dynamisch bereik. Dat geeft, in dB uitgedrukt, het verschil tussen de kleinste en de grootste signaalamplituden die verwerkt kunnen worden. Omdat de CD met 16 bit werkt, kan de momentele waarde van het analoge signaal in 65.536 stapjes onderverdeeld worden, die ieder door een individuele code worden voorgesteld. Als men een analoog signaal met een maximale waarde van 10 V met 16 bit bemonstert betekent dit dat een amplitudeverschil van 0,152 mV nog gedecodeerd kan worden. Een en ander heeft tot gevolg dat een CD **in theorie** een dynamisch bereik heeft van 96 dB.

In theorie, omdat het dynamische bereik in eerste instantie wordt bepaald door de technische mogelijkheden van de studio waarin de mastertape wordt gemaakt. Alleen studio's waarin volledig digitaal wordt gewerkt, dus waar digitale recorders en dito mengtafels ter beschikking staan, kunnen geluidssignalen met een dergelijk groot dynamisch bereik zonder compressietechnieken verwerken. En zelfs dan

7.5 Signaalverwerking in de CD-speler

blijft de vraag open of microfoons, typische analoge instrumenten, dergelijke grote luchtdrukverschillen zonder vervorming in het hoog en volledig maskerende ruis in het laag kunnen verwerken.
Niet voor niets is iedere CD voorzien van een van de magische kreten "AAD", "ADD" of "DDD"! Een korte verklaring van deze termen is misschien wel op zijn plaats.

- AAD
  Het muzieksignaal van CD's waarop "AAD" staat is analoog opgenomen, analoog gemengd en uiteraard digitaal op de CD gezet. Dat betekent dat de geluidssignalen op traditionele analoge bandrecorders werden opgenomen en met traditionele analoog werkende mengtafels werden gemengd. Bij dergelijke opnames wordt zonder enige twijfel gebruik gemaakt van compressietechnieken om de simpele reden dat analoge recorders dynamiekverschillen van 96 dB niet onvervormd kunnen verwerken!
  Het logische gevolg is dat dergelijke CD's een veel kleinere dynamiek hebben dan de theoretisch haalbare waarde van 96 dB. Even doordenkend betekent dit dat het hoogste bit MSB van de 16 bit audiocode waarschijnlijk nooit ofte nimmer wordt gebruikt! Onderzoekers die het als hun levenstaak zien alles wat met het CD-verschijnsel te maken heeft grondig en kritisch te onderzoeken hebben tests uitgevoerd waaruit blijkt dat er tal van AAD-CD's in de handel zijn die met een resolutie van slechts 14 bit werken.
- ADD
  Bij deze plaatjes werd het basismateriaal nog steeds op een analoge recorder opgenomen. Nadien werd het signaal gedigitaliseerd en in digitale mengtafels verder verwerkt. Hoewel het in principe mogelijk is digitale dynamiekverruiming op een signaal toe te passen blijft de vraag open of ook deze plaatjes niet met minder dan 16 bit werken.
- DDD
  Alleen DDD-CD's hebben, op de microfoon na, nooit een analoge schakeling gezien. Deze schijven zijn in de moderne volledig digitaal werkende studio's opgenomen hetgeen betekent dat de (analoog versterkte) microfoonsignalen onmiddellijk in digitale codes worden omgezet en als dusdanig op digitale recorders worden opgenomen. Dergelijke CD's kunnen dus ook in de praktijk gebruik maken van de 16 bit resolutie die ter beschikking staat en het daarmee samenhangende dynamische bereik van 96 dB.

Een uitgebreide verklaring die nodig is om de gedachtengang van de makers van CD-spelers die werken met "adaptive floating decimal upsampling" te kunnen volgen. Als de meeste CD's toch niet of nauwelijks alle 16 bits gebruiken, dan is het onzin dure 16 bit omzetters in te bouwen. Beter kan men gebruik maken van 14-bitters, die de veertien laagste bits van de code omzetten. In het digitale filter is echter een extra schakeling aanwezig, die de waarde van de MSB-1 en MSB bits wel continu bewaakt.
Zou er nu toch een zeer luide muziekpassage voorkomen waardoor een of beide bits "H" worden, dan zorgt het digitale filter ervoor dat de 14 bits van de DAC ofwel met de bits LSB+1 tot en met MSB-1 ofwel met de bits LSB+2 tot en met MSB worden verbonden.

Het logische gevolg is uiteraard dat in deze beide gevallen het LSB of LSB én

7.5 Signaalverwerking in de CD-speler

LSB+1 bit niet worden betrokken bij het omzettingsproces. Maar net bij dergelijke luide passages is dat absoluut geen ramp, omdat de gegevens die in deze bits zitten zo weinig bijdragen aan het geluid dat niemand dat merkt (Hifi-puristen uitgezonderd).

Naar 18 en 20 bit resolutie!

Alvorens de twee laatste procédés worden besproken moet toch nog iets gezegd worden over de allernieuwste ontwikkelingen op het DAC-front. Sinds begin 1989 zijn CD-spelers op de markt die pronken met kreten als "18 bit oversampled" of "noise shaping".

Men kan zich de vraag stellen wat de zin is van het gebruik van 18 bit omzetters als de bron, de CD, maar 16 bit informatie bevat.

Er zijn twee soorten systemen ontwikkeld die zichzelf een resolutie van 18 bit toekennen.

Bij het eerste systeem wordt gebruik gemaakt van de reeds besproken floating-techniek, maar nu met een 16 bit DAC. Het probleem van zo'n DAC is dat de twee laagste bits wel eens kunnen verdrinken in de onnauwkeurigheid van de hoogste bits.

Zolang het signaal op de plaat een resolutie van 14 bit heeft worden de 14 hoogste bits van de DAC verbonden met de 14 laagste bits van de plaat. De twee problematische bits van de DAC zijn uitgeschakeld en er is geen sprake van niet-monotoon gedrag.

Als de CD-informatie 15 bit breed wordt, zal de DAC een bitje opschuiven. Alleen het onderste bit van de omzetter wordt nu niet gebruikt. Als tot slot alle 16 bits van de CD actief zijn schuift de DAC weer een bitje naar boven, zodat de normale situatie ontstaat.

Een en ander wordt door de fabrikanten uitgelegd als ware de CD-speler uitgerust met een "echte" 18-bitter.

Er zijn een aantal spelers op de markt die echter wél met "echte" 18-bitters en zelfs "echte" 20-bitters zijn uitgerust.

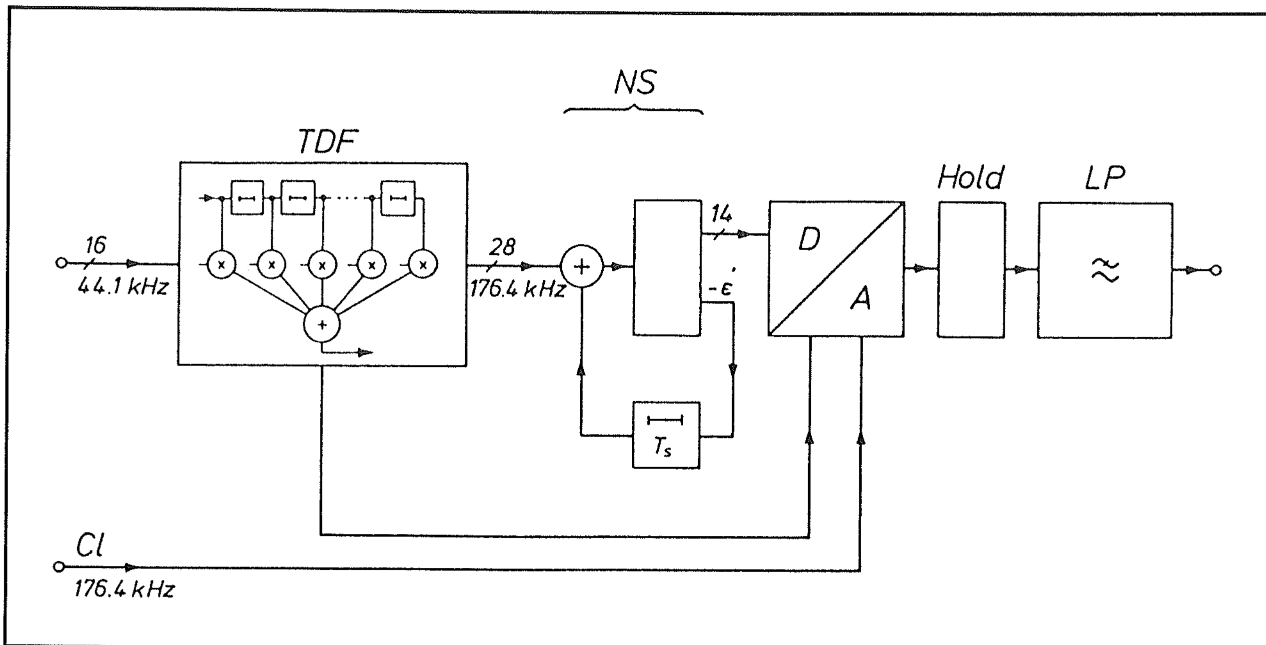
Daar kunnen twee kritische opmerkingen over gemaakt worden. Als specialisten beweren dat zij nog nooit een helemaal monotone 16 bit brede DAC hebben kunnen ontdekken is de kans uiterst klein dat er opeens fabrikanten in staat zouden zijn 18- en 20-bitters te fabriceren die wel monotoon zouden werken.

Op de tweede plaats kan men zich de vraag stellen waar die twee extra bits informatie vandaan komen. Het antwoord is eenvoudig te geven. Bij het berekenen van de filtercoëfficiënten in een digitaal transversaal filter kan men de nauwkeurigheid zo hoog opvoeren als men zelf wil. De filtercoëfficiënten zijn immers geen gehele getallen en het hangt er maar vanaf hoeveel decimalen na de komma men in de berekening wil betrekken. Het is dan digitaal helemaal geen kunst om uit deze berekeningen monsters te halen die 18, 20 of zelfs 40 bit breed zijn!

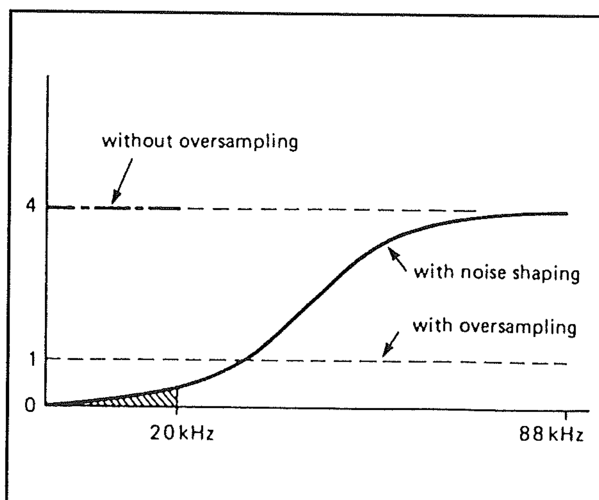
Fabrikanten die deze technieken toepassen beweren dat zij via deze berekeningen op de 16 bit datastroom van de CD de resolutie en dus de nauwkeurigheid van de uiteindelijke geluidsweergave kunnen opvoeren.

Een logisch gevolg van deze bredere digitale monsters is dat de samplefrequentie nog verder opgevoerd moet worden. Bij diverse fabrikanten is reeds sprake van achtvoudige upsampling, hetgeen een samplingfrequentie van niet minder dan 352,89 kHz tot gevolg heeft.

7.5 Signaalverwerking in de CD-speler



Figuur 5/7.5-35: Het blokschema van een systeem dat "noise shaping" aan de digitaal naar analoog omzetting toevoegt.



Figuur 5/7.5-36: De invloed van "noise shaping" op de ruis in het hoorbare gebied.

Hoe dergelijke DAC's in staat zijn deze datastroom zonder glitch-problemen te verwerken is vooralsnog een raadsel.

Met het begrip "noise shaping" wordt een bepaalde digitale foutcorrectie in het digitaal transversaal filter aangeduid, die tegenwoordig onder meer door Philips wordt toegepast. Het blokschema van zo'n systeem is getekend in figuur 5/7.5-35.

In het DTF worden monsters van 28 bit gegenereerd. Zoals gezegd kan dat door de nauwkeurigheid en het aantal van de filtercoëfficiënten op te voeren. Natuurlijk zit er nog steeds een fout op de berekeningen!
Het zal duidelijk zijn dat deze fout in de laagste bits van de code is terug te vinden. De 14 hoogste bits worden aan een 14 bit brede DAC aangeboden. De 14 laagste bits worden teruggekoppeld naar het DTF en verdisconteerd bij de samenstelling van het volgende monster. Met deze tegenkoppeling van de afrondingsfout wordt een niet onaardige vermindering van de quantiseringsruis bereikt. Als illustratie is in figuur 5/7.5-36 een door Philips gegeven vergelijkingsgrafiekje opgenomen.

7.5 Signaalverwerking in de CD-speler

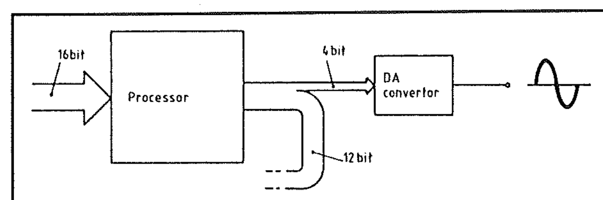
De vertikale as geeft een relatieve maat voor de ruis. Zonder upsampling is de ruis een factor vier.
Met viervoudige upsampling daalt de ruis tot een factor een, dus een reductie met een factor vier! Door het toepassen van noise shaping zal de ruis in het gebied tussen 0 en 20 kHz nog met ongeveer de helft dalen. Uitgedrukt in dB betekent dit een verlaging met 7 dB. Vandaar dat er op dit moment CD-spelers worden aangeboden waarvan de signaal/ruis verhouding groter is dan de theoretisch maximale waarde van 96 dB.
De extra ruisreductie wordt kunstmatig opgewekt in het digitaal transversaal filter met terugkoppeling.

Pulse width modulation convertion
Naarmate de mate van upsampling vergroot nemen de problemen toe die opgelost moeten worden bij het ontwerpen van traditionele 14, 16 of 18 bit DAC's. Deze schakelingen leveren immers glitches gedurende de codewisselingen en hoe hoger de samplingfrequentie, hoe meer die glitches het signaal gaan beïnvloeden.

Door het ontwikkelen van de noise-shaping techniek met de daaraan verbonden digitale terugkoppeling zijn een aantal fabrikanten op een geheel nieuw idee gekomen.
In plaats van alle 16 bits aan de DAC aan te bieden worden slechts de vier hoogste bits omgezet in een analoog signaal. Bovendien worden deze bits eerst nog eens getransformeerd naar één puls. De dutysycle, dus de pulsbreedte of aan/uit-verhouding, van deze puls hangt af van de codesamenstelling van de vier hoogste bits. Vandaar dat men dit procédé in het algemeen pulse width modulation conversion noemt.

Dit procédé wordt echter door de diverse fabrikanten onder diverse namen aangeprezen.
Zo heeft Technics het over "MASH"-conversie, de afkorting van Multi Stage Noise Shaping System. Sansui past hetzelfde principe toe onder de naam "LDCS", afkorting van Linear Direct Conversion System.

Het blokschema van dit procédé is getekend in figuur 5/7.5-37.

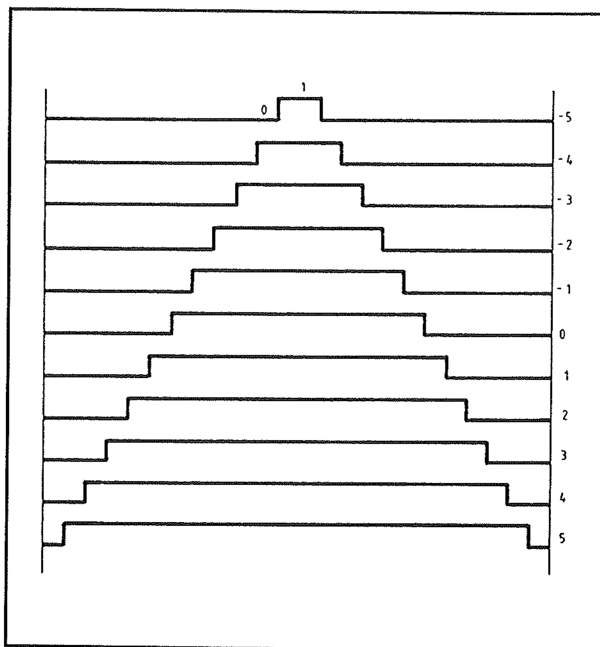


Figuur 5/7.5-37: Het blokschema van een DAC met pulsbreedte modulatie.

De 16 bits van de CD-code worden eerst in een processor niet minder dan 32 keer ge-upsampled. De frequentie van de uitgangscodes bedraagt dan 1,4 MHz! Van deze monsters gaan de vier hoogste bits naar de pulsbreedte modulator. Deze zet de inhoud van deze bits om in een puls waarvan de aan/uit-verhouding in elf stappen ingesteld kan worden, zie figuur 5/7.5-38.

Als de samenstelling van de vier hoogste bits gelijk is aan "H-L-L-L" zal de puls een aan/uit-verhouding van precies 50 % hebben. De gemiddelde gelijkspanningsinhoud is dan nul. Stijgt de code, dan wordt de "H"-periode breder, zodat het signaal een positieve gelijkspanning vertegenwoordigd. Daalt de code, dan wordt de "L"-periode breder, zodat het signaal een negatieve spanningsinhoud krijgt.

7.5 Signaalverwerking in de CD-speler



Figuur 5/7.5-38: Het in breedte gemoduleerde signaal dat door een integrator in een analoge spanning wordt omgezet.

Deze zeer snelle puls wordt nu aangeboden aan een integrator, die de gemiddelde gelijkspanningsinhoud van de puls op een condensator zet.
Over dit onderdeel ontstaat dus een analoog signaal waarvan de momentele waarde afhankelijk is van de duty-sycle van de puls en dus ook van de samenstelling van de vier hoogste bits van het upsample monster.

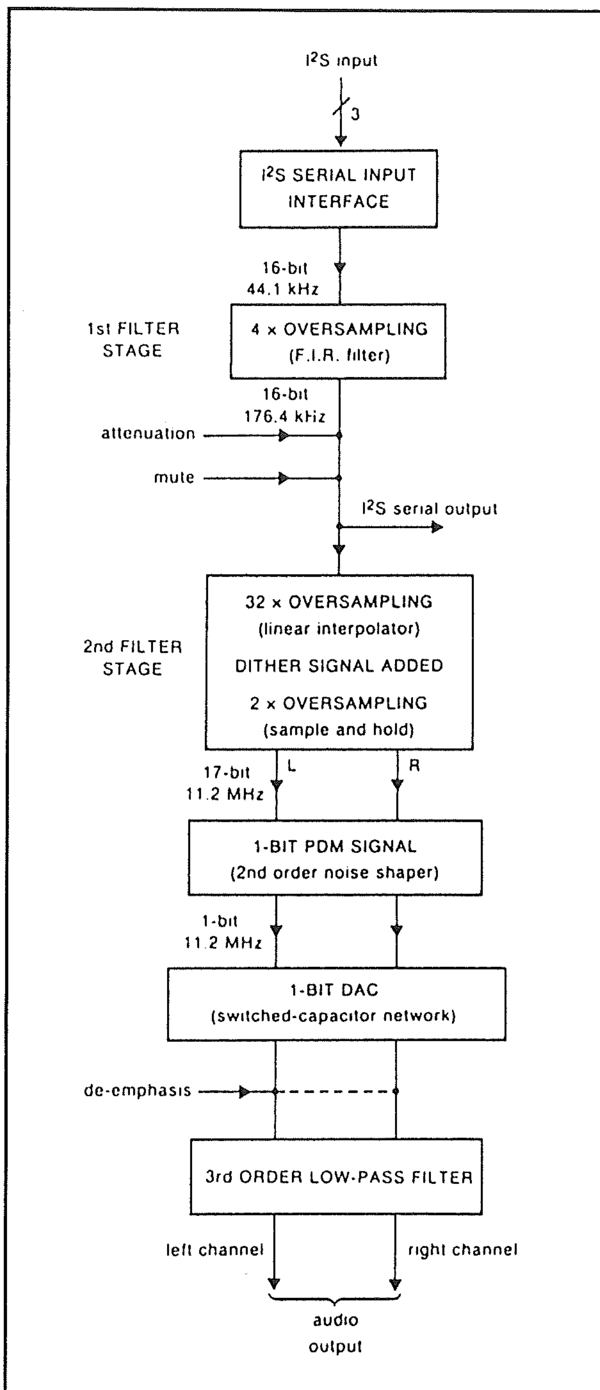
Nu kan men zeggen dat het met dit systeem niet mogelijk is alle duizenden signaalstapjes van de oorspronkelijke 16 bit CD-code te reproduceren. Dat zou het geval zijn als er geen terugkoppeling werd toegepast. Door de terugkoppeling van de 12 laagste bits naar het digitaal transversaal filter worden de vier hoogste bits van de eerstvolgende upsample code zo aangepast dat de uitgangsspanning van de integrator verder naar de juiste waarde wordt gestuurd. Bij iedere upsample-cyclus zal de uitgangsspanning van de integrator de analoge waarde die overeen komt met de samenstelling van de CD-code die op dit moment verwerkt wordt beter benaderen. Vergeet niet dat er dank zij de 32-voudige upsampling een zee van tijd is voor het systeem om dit proces uit te voeren!

De grote voordelen van de pulsbreedte modulatie zullen duidelijk zijn.
- Er wordt geen gebruik gemaakt van stroombronnen die precies op elkaar afgestemd moeten worden.
- Er ontstaan geen problemen met digitale cross-over vervorming.
- Door de afvlakkende werking van de integrator heeft men geen last van glitches.
- Het systeem werkt met zo'n hoge samplingfrequentie dat er nauwelijks nog analoog gefilterd moet worden. Er zijn zelfs CD-spelers volgens het MASH-procédé op de markt, waarin niet meer analoog gefilterd wordt!

De enige kritiek die men op deze methode kan hebben is dat de spanning over de integratorcondensator zich "langzaam" tot de juiste waarde opbouwt gedurende het verwerken van een CD-code en niet onmiddellijk bij het verschijnen van een nieuwe CD-code naar de nieuwe analoge waarde springt. Dit soort vertragingen zijn echter eigen aan iedere vorm van terugkoppeling en analoge eindversterkers hebben er dus ook last van.

Eén bit switched capacitor convertion
Dit procédé is een verdere ontwikkeling van de pulsbreedte modulatie. Philips noemt zijn CD-spelers die volgens dit procédé werken "Bitstream-convertors".

7.5 Signaalverwerking in de CD-speler



Figuur 5/7.5-39: Het blokschema van een Bitstream-omzetter van Philips.

Het principe-schema is getekend in figuur 5/7.5-39.

De oorspronkelijke CD-code wordt in twee stappen niet minder dan 256 keer ge-upsampled. Er ontstaan dus monsters met een frequentie van 11,28 MHz. De breedte van deze monsters bedraagt 17 bit. Van deze codes wordt alleen het MSB naar een één bit brede DAC gevoerd. Deze DAC werkt met een condensator die via elektronische schakelaars, gestuurd door het bit, wordt opgeladen. Vandaar de naam "switched capacitor". De 16 laagste bits worden uiteraard weer teruggekoppeld en zorgen ervoor dat het hoogste bit zo wordt aangepast dat de spanning over de condensator weer langzaam naar de analoge waarde van de in behandeling zijnde CD-code toegroeit.

Philips heeft een IC ontwikkeld waar het gehele proces is in geïntegreerd: de SAA7320. Deze schakeling wordt op dit moment alleen gebruikt in draagbare CD's van mindere kwaliteit. Er is echter een nieuwe schakeling, de SAA7340, in ontwikkeling die gebruikt zal worden in CD-spelers van de betere klasse.

7.5 Signaalverwerking in de CD-speler

5/7.6

Voorbeeldschakelingen van CD-spelers

Inleiding

In dit hoofdstuk worden, als afronding van de bespreking van het CD-systeem, een aantal min of meer uitgewerkte schema's van japanse en europese CD-spelers beschreven. Uit deze schema's blijkt de samenhang tussen de diverse speciale IC's die voor het samenstellen van de elektronica van een CD-speler nodig zijn. Ook zal duidelijk de technologische evolutie blijken uit het steeds afnemen van het aantal noodzakelijke IC's.

Voor CD-spelers van Philips kan men een soort generatie-overzicht samenstellen. Uit deze tabel van figuur 5/7.6-1 kan men afleiden welke IC-sets in de loop der jaren door deze fabrikant zijn gefabriceerd voor het ontwerpen van de volledige elektronica van een CD-speler.

Figuur 5/7.6-2

Twee blokschema's van het digitale deel van japanse CD-spelers van de eerste generatie. Er wordt gebruik gemaakt van CX-IC's van Sony.

In latere ontwerpen werd de volledige combinatie CX23020, CX7933, CX7934 en CX7935 vervangen door één IC, namelijk de CX23035.

Figuur 5/7.6-3

Praktisch deelschema van de DAC en de analoge elektronica van een CD-speler van Hitachi.

Er wordt gebruik gemaakt van een DAC van het type CX20017 van Sony, die in hoofdstuk 5/7.5 werd besproken. De sample and hold schakelingen zijn nog opge-

<table>
<tr><th>GENERATIE</th><th>1</th><th>2</th><th>3</th><th>2 + 3</th></tr>
<tr><td>DEMODULATOR</td><td>SAA 7010</td><td rowspan="2">SAA 7210</td><td rowspan="3">SAA 7310</td><td rowspan="2">SAA 7310</td></tr>
<tr><td>FOUTCORRECTIE</td><td>SAA 7020</td></tr>
<tr><td>INTERPOLATIE</td><td>SAA 7000</td><td rowspan="2">SAA 7220</td><td>- - - - - -</td></tr>
<tr><td>DIGITAAL FILTER</td><td>SAA 7030</td><td rowspan="2">SAA 7320</td><td>SAA 7220</td></tr>
<tr><td>D/A OMZETTER</td><td>TDA 1540</td><td>TDA 1541/42</td><td>TDA 1541/42</td></tr>
</table>

Figuur 5/7.6-1: Generatietabel voor CD-spelers van Philips.

bouwd uit discrete onderdelen rond opamp's en FET's!

Figuur 5/7.6-4
Basis-schakeling die vaak in oudere japanse CD-spelers zal worden aangetroffen. Als DAC wordt een PCM53-V van Burr-Brown toegepast, een IC-fabrikant die zich heeft gespecialiseerd in het ontwerpen van CD-DAC's.
Dat IC is een 16 bit omzetter met stroombronnen. De stroom van deze bronnen wordt bepaald door zeer stabiele dunne film weerstanden uit nikkel-chroom op de chip, die met een laser worden afgeregeld.
De ene DAC wordt voor beide kanalen gebruikt.
De uitgang gaat naar twee deglitcherschakelingen die ook dienst doen als sample and hold. De ene analoge uitgang van de DAC wordt door middel van twee elektronische omschakelaars met beide deglitchers verbonden.

Figuur 5/7.6-5
Basisschema van japanse apparaten waar gebruik wordt gemaakt van upsampling. Het digitaal transversaal filter YM-2201 van Yamaha wordt afgesloten met een 16 bit brede DAC van Burr-Brown. Het filter werkt met dubbele upsampling, de samplingfrequentie van de PC53 bedraagt dus 88,2 kHz.
Ook nu wordt de DAC heen en weer geschakeld tussen de beide deglitchers aan de uitgang.

Figuur 5/7.6-6
Basisschema rond een moderne 18 bit brede DAC van Burr-Brown, het type PCM64P.
Dit IC wordt vaak aangetroffen in de duurdere japanse merken.
Let op de instelpotentiometers rechts boven in het schema. Met deze onderdelen kunnen de vier hoogste bits van de DAC individueel worden afgeregeld om de kans op niet-monotoon gedrag te minimaliseren. Als referentiespanning wordt een gestabiliseerde spanning van +10 V gebruikt die wordt gegenereerd door een spanningsreferentie van het type REF101.

Figuur 5/7.6-7
Blokschematische samenstelling van een eerste generatie CD-speler van Philips. Er worden twee 14 bit brede DAC's toegepast van het type TDA1540, IC dat in hoofdstuk 5/7.5 werd besproken.
De SAA7030 is het digitaal transversaal filter dat zijn uitgangscodes via een tweedraads seriële bus naar de DAC's voert. In de TDA1540 worden de seriële codes in een schuifregister ingelezen, zodat zij onder parallelle vorm ter beschikking staan.

Figuur 5/7.6-8
Blokschematische voorstelling van de elektronica van een typische tweede generatie CD-speler van Philips.
De TDA1541 is een stereo DAC die volgens het zelfde dynamic element matching principe werkt als de TDA1540, maar die 2 x 16 bit resolutie heeft.

Figuur 5/7.6-9
Uitgewerkt praktisch schema van het rechter gedeelte van het blokschema uit de vorige figuur.
Er worden discreet opgebouwde derde orde Besselfilters toegepast (IC5 en IC6).

Merk op dat er in deze filters schakelaars staan. Dat is bedoeld om de weergavekarakteristieken van de filters aan te passen als er ooit CD-plaatjes met deëmphasis op de markt zouden komen. De decoder

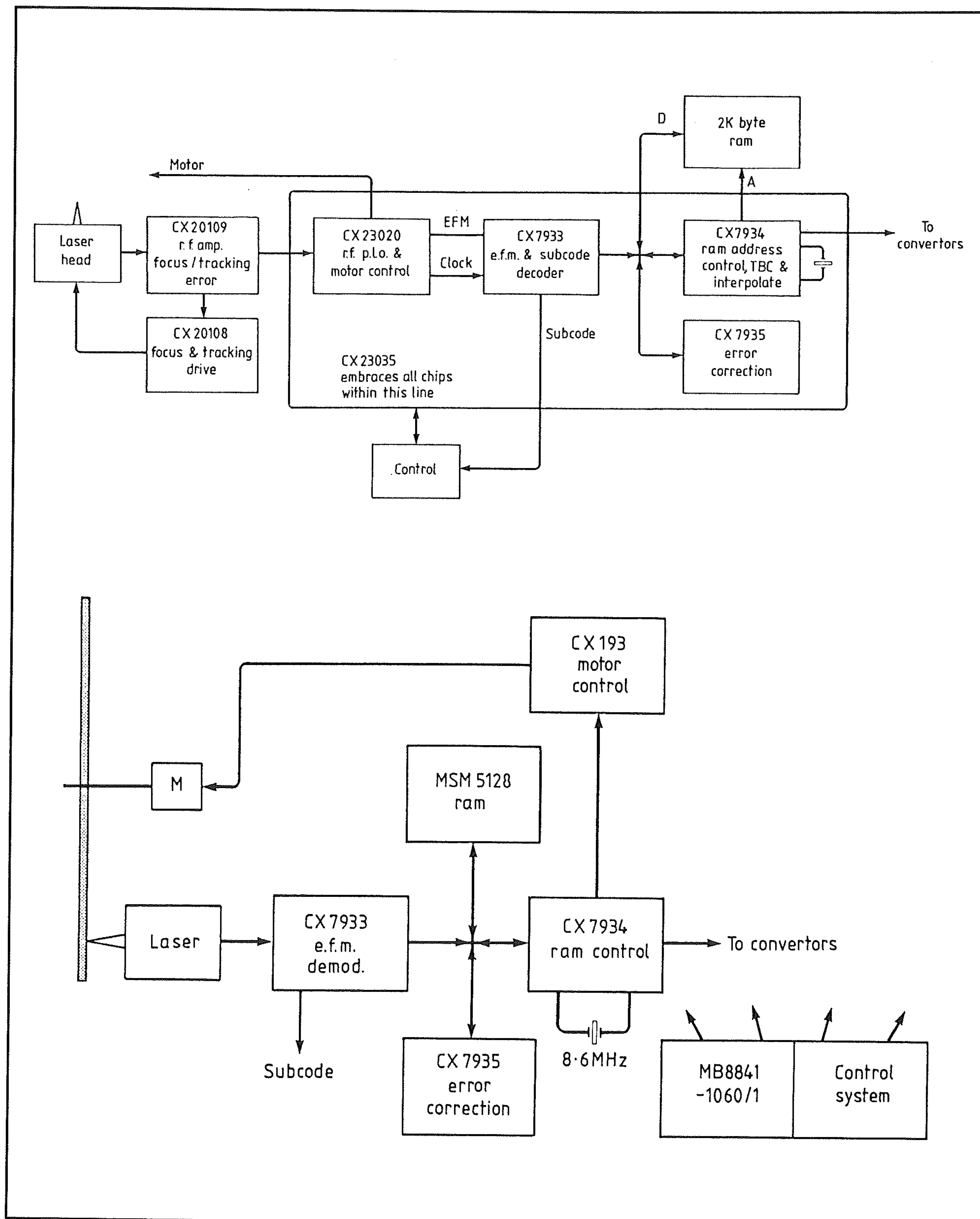
7.6 Voorbeeldschakelingen van CD-spelers

SAA7210 evalueert onder meer de bits van de subcode waarin de informatie is opgenomen over het al dan niet toepassen van deëmphasis bij de opname en stuurt via een transistor in voorkomend geval twee relais die de filterschakelaars bedienen.

Zie voor de bespreking van het deëmphasisprincipe hoofdstuk 5/7.3.

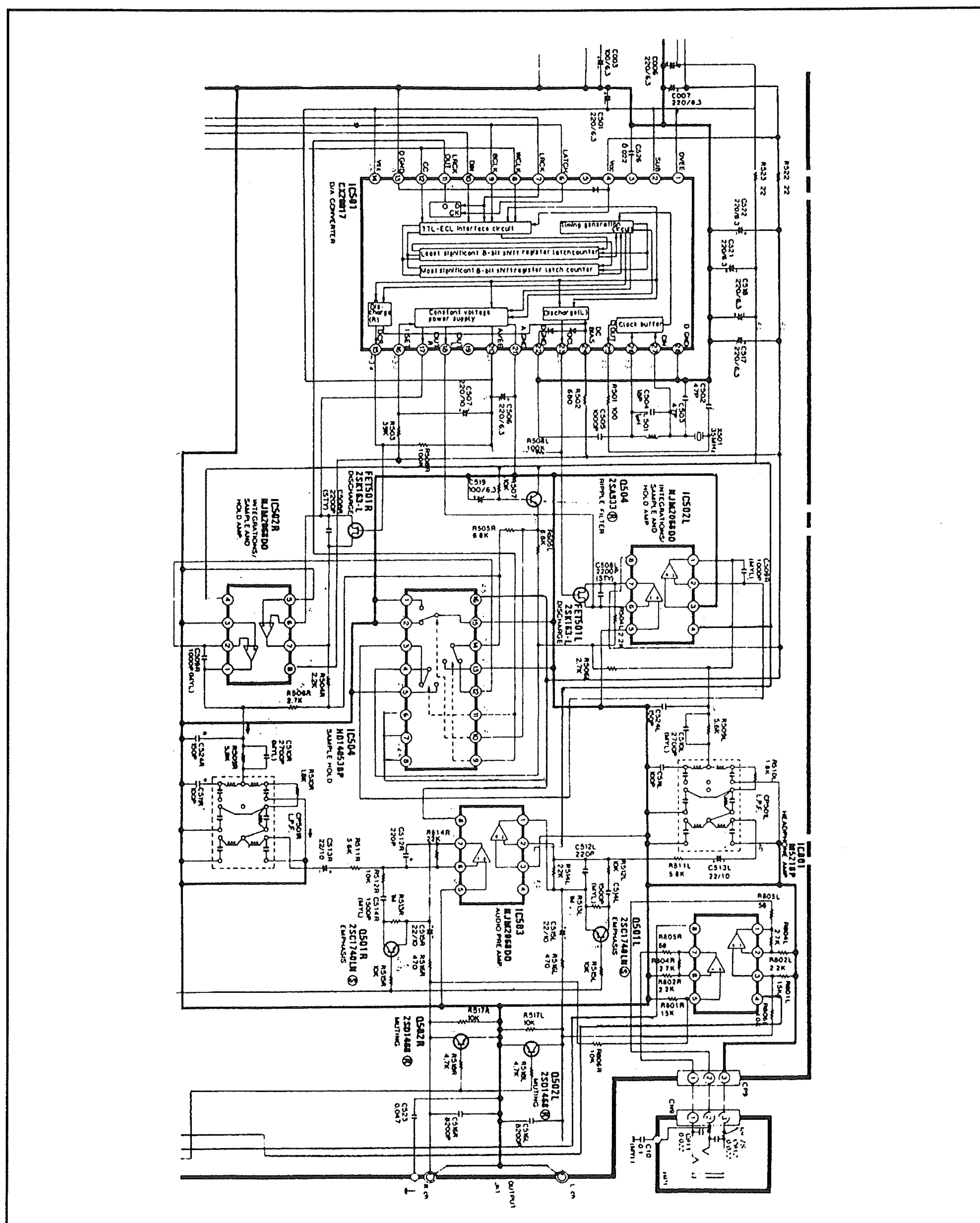
Figuur 5/7.6-10
Schema van een moderne derde generatie CD-speler met Philips IC's. Er zijn nu nog slechts twee geïntegreerde schakelingen nodig voor de volledige digitale en analoge bewerking van de CD-codes! Uiteraard is daarnaast wel nog een dynamisch RAM nodig en de controleprocessor.

7.6 Voorbeeldschakelingen van CD-spelers



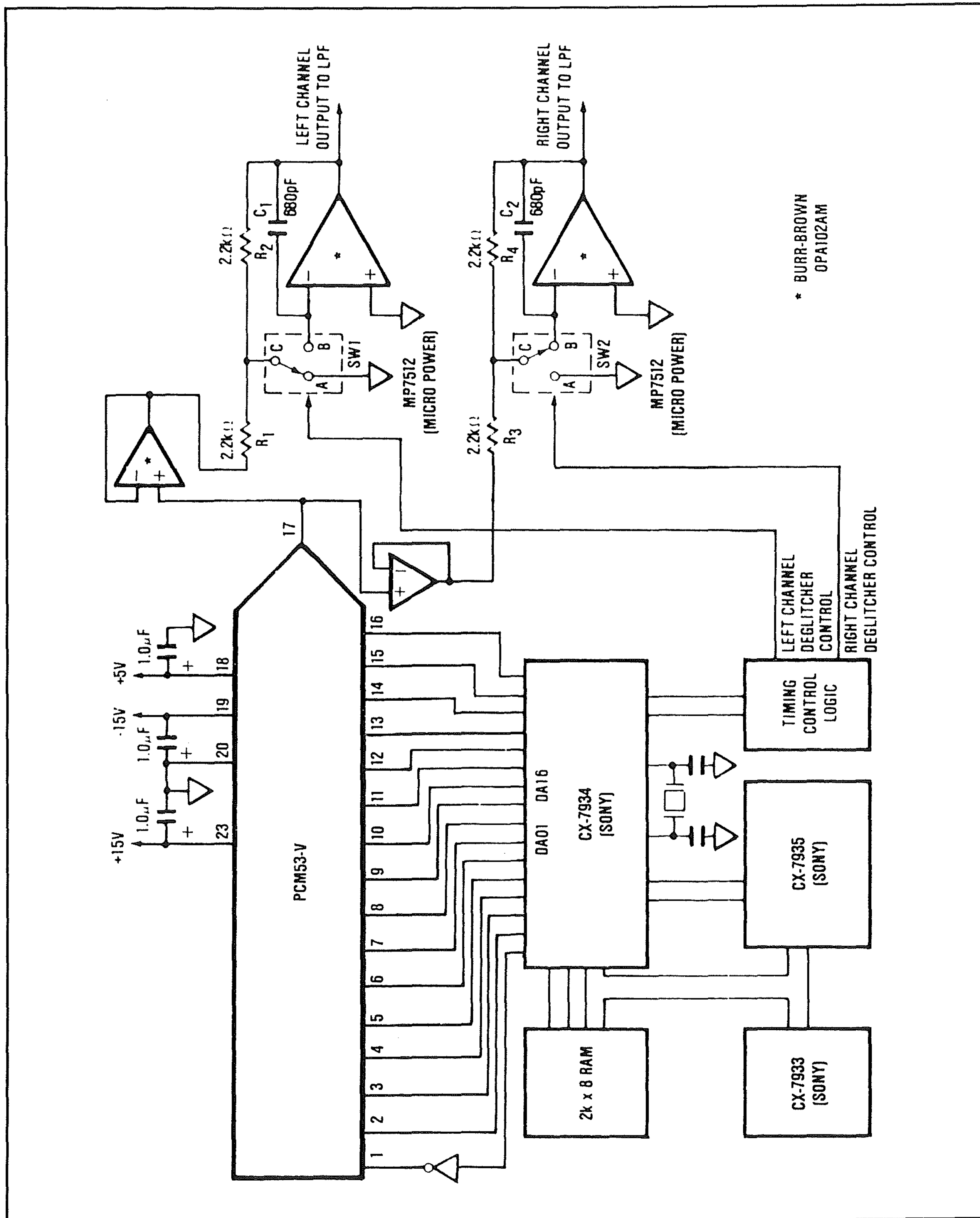
Figuur 5/7.6-2: Digitale elektronica van oude japanse CD-spelers.

7.6 Voorbeeldschakelingen van CD-spelers



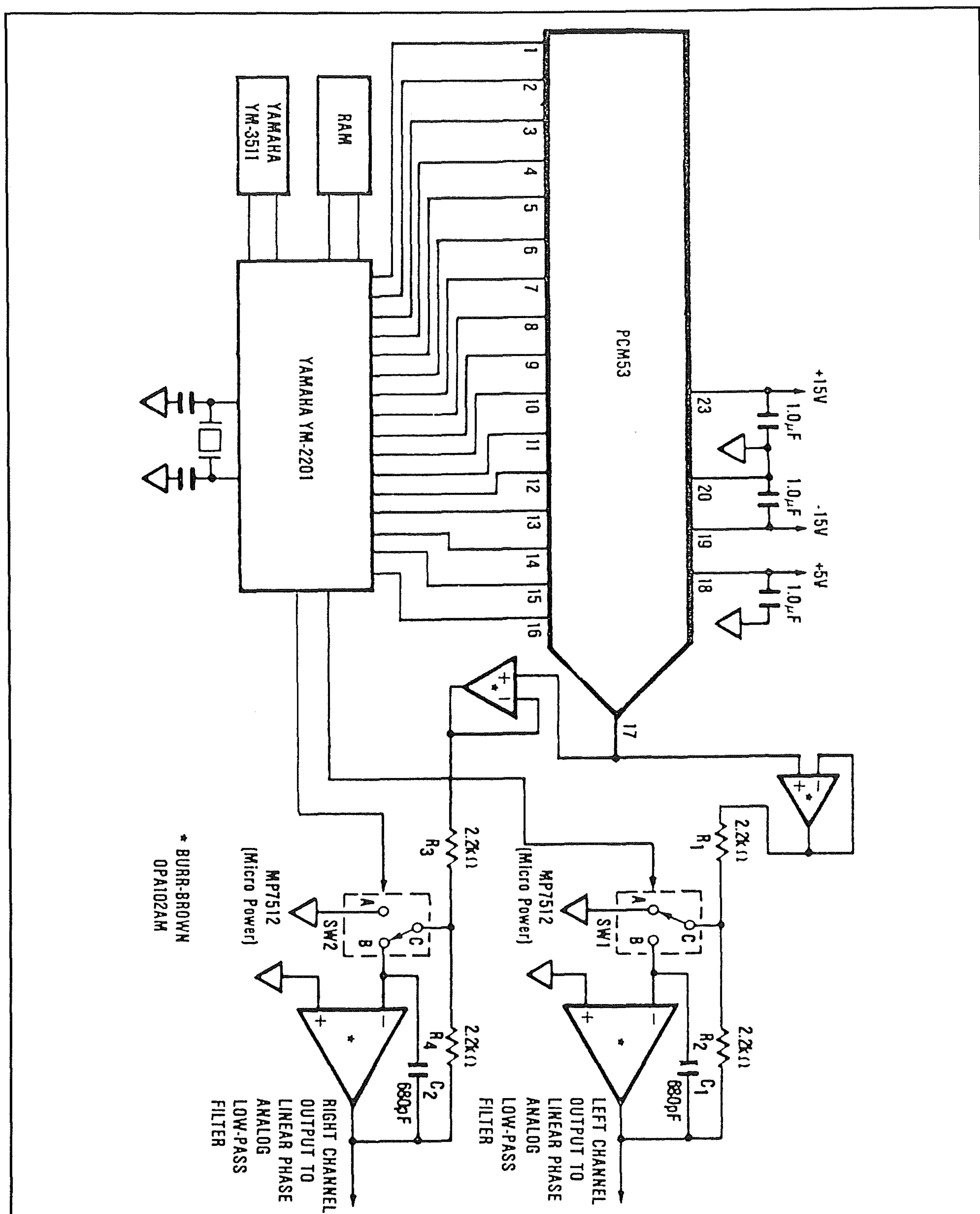
Figuur 5/7.6-3: Praktisch schema analoog deel van een Hitachi CD-speler.

7.6 Voorbeeldschakelingen van CD-spelers



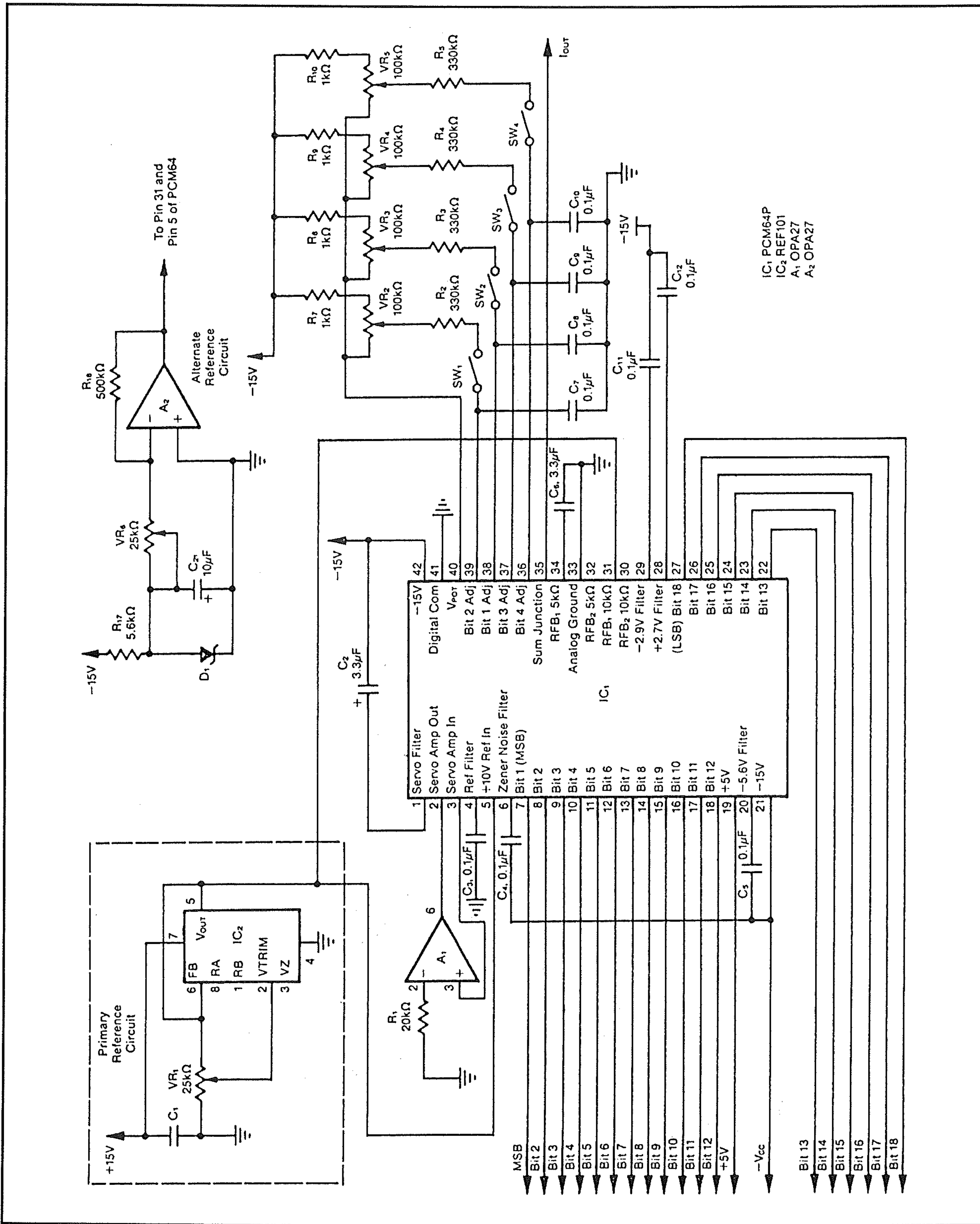
Figuur 5/7.6-4: Blokschema van een standaard japanse CD-speler met Burr-Brown DAC.

7.6 Voorbeeldschakelingen van CD-spelers



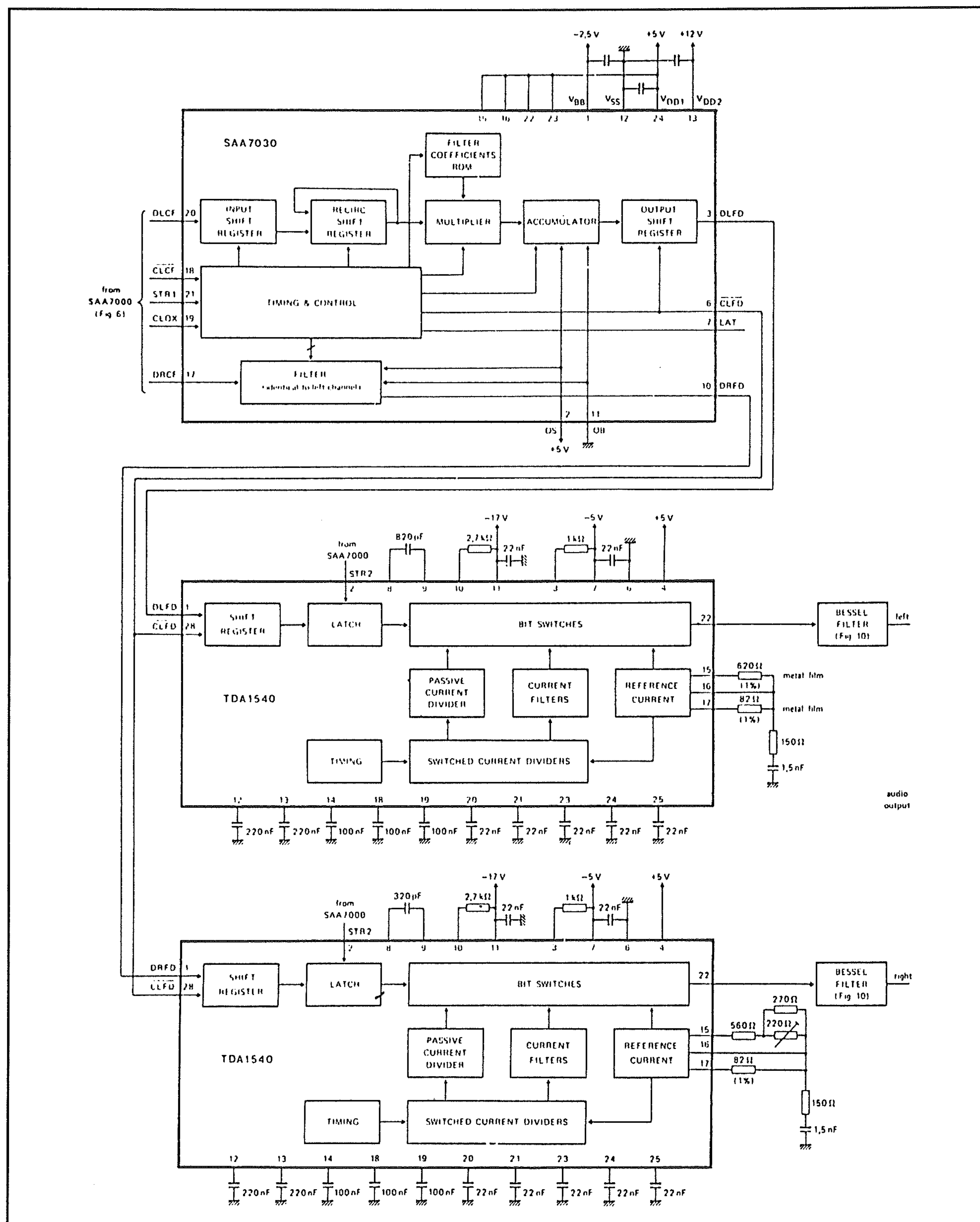
Figuur 5/7.6-5: Schema van japanse CD-speler met tweevoudige upsampling.

7.6 Voorbeeldschakelingen van CD-spelers



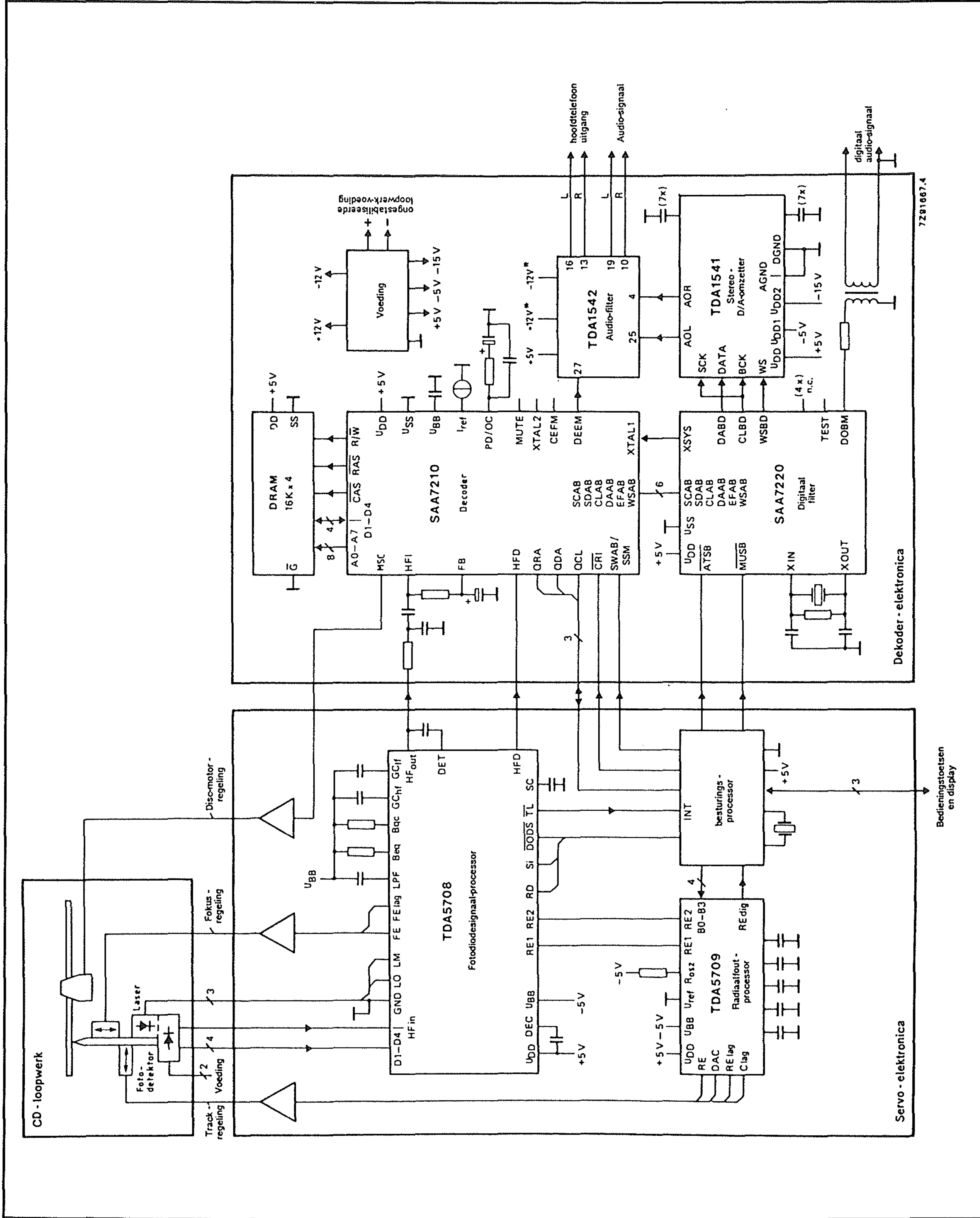
Figuur 5/7.6-6: Moderne CD-speler uit japan met 18 bit brede DAC.

7.6 Voorbeeldschakelingen van CD-spelers



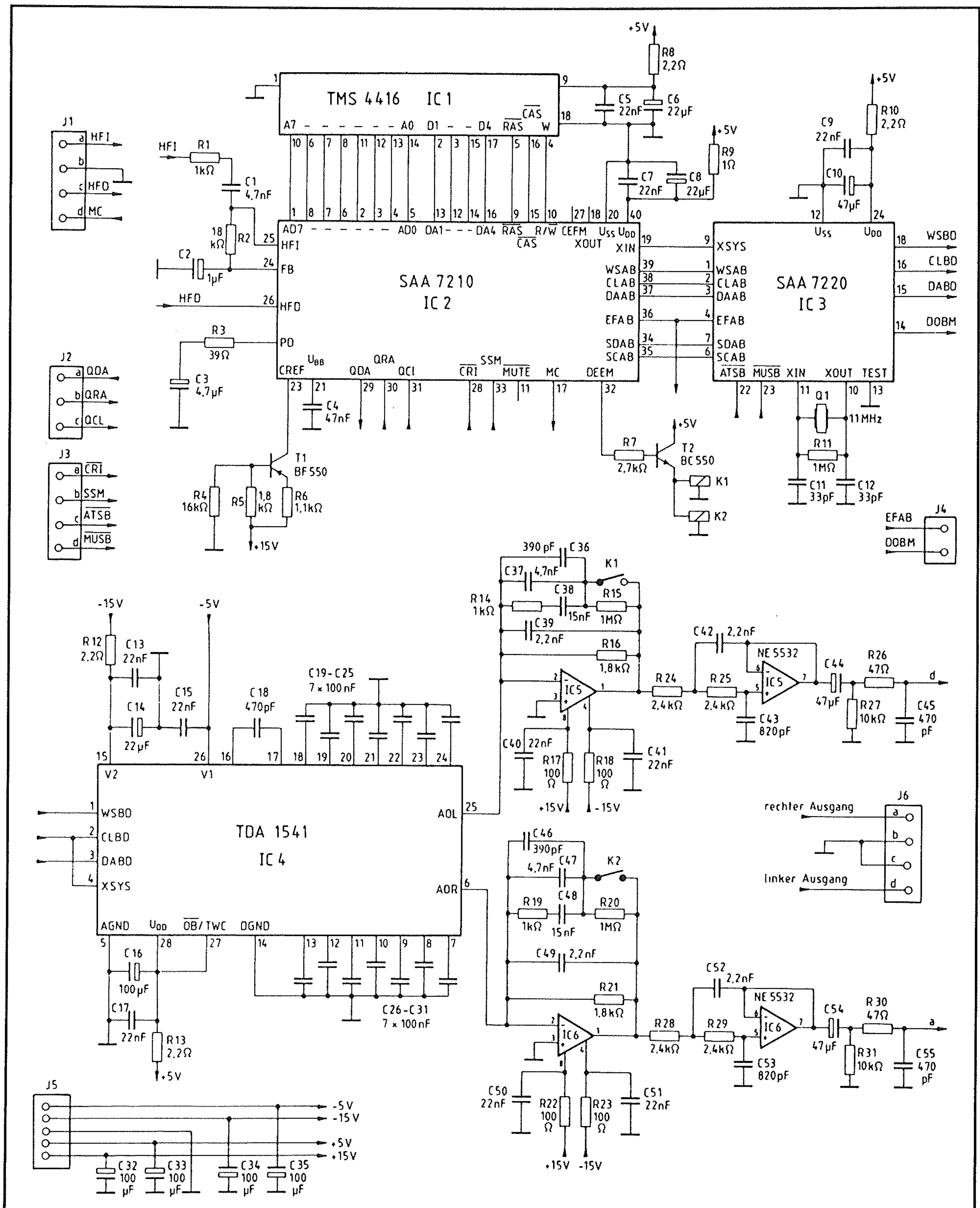
Figuur 5/7.6-7: Eerste generatie CD-speler met Philips IC's.

7.6 Voorbeeldschakelingen van CD-spelers



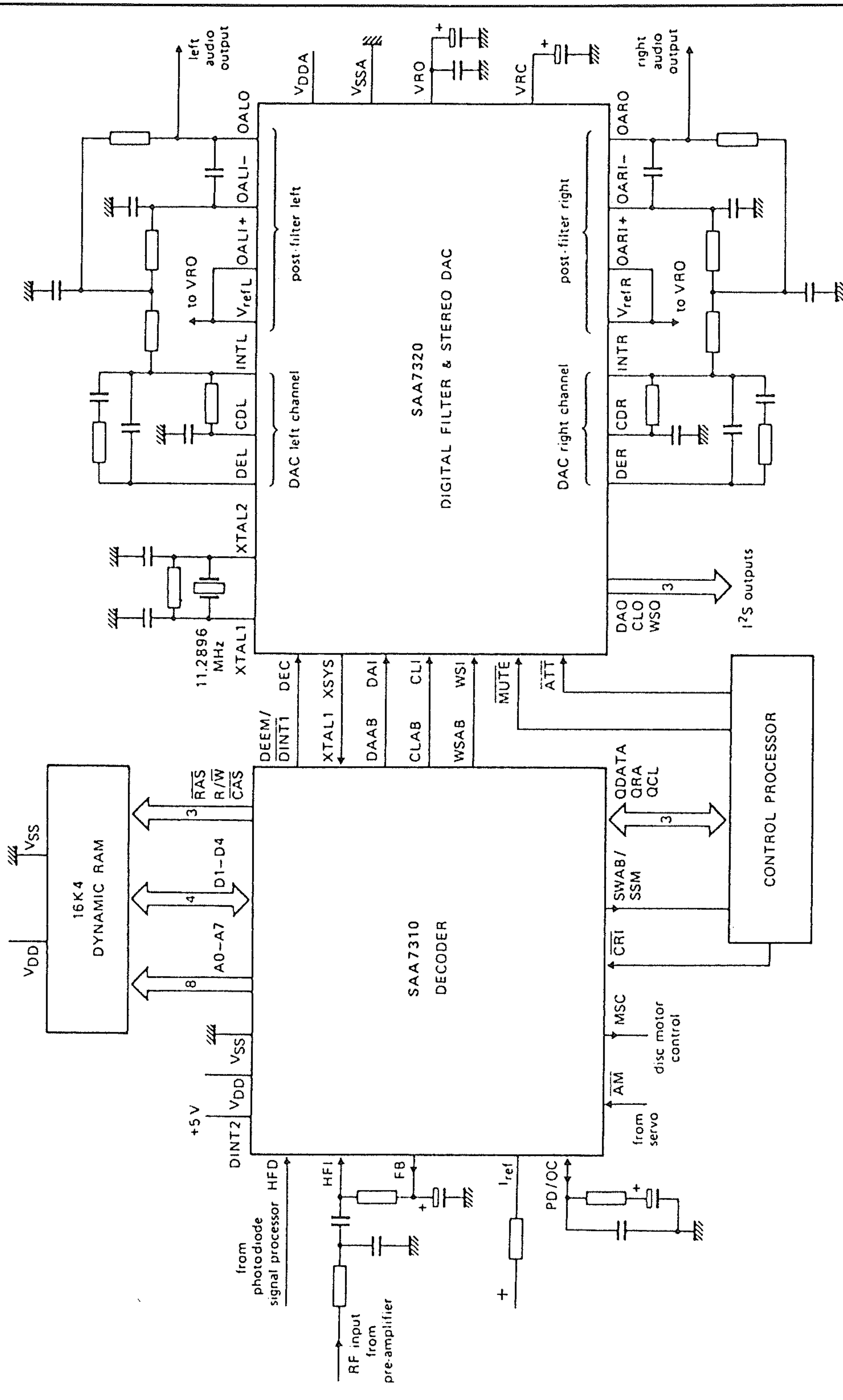
Figuur 5/7.6-8: Blokschema van een tweede generatie CD-speler van Philips.

7.6 Voorbeeldschakelingen van CD-spelers



Figuur 5/7.6-9: Praktisch uitgewerkt schema van een tweede generatie CD-speler van Philips.

7.6 Voorbeeldschakelingen van CD-spelers



Figuur 5/7.6-10: Het wel zeer eenvoudige schema van een derde generatie CD-speler van Philips.

5/7.7 SACD, de Super Audio CD

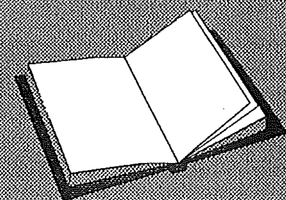
Inleiding

Volgens Philips en Sony, de vaders van de Audio CD, is dit systeem aan een "up-date" toe. Door de research rond het DVD-systeem heeft de massa-fabricage van dubbele-laag CD's geen geheimen meer. Waarom dan dergelijke dubbele-laag CD's niet toepassen voor het verbeteren van de specificaties van het aloude Audio CD principe? De Super Audio CD, SACD zoals het nieuwe systeem gaat heten, biedt achterwaartse compatibiliteit met de bestaande Audio CD. De SACD is gebaseerd op een hybride-schijf, die twee lagen bevat. Een volledig reflecterende laag wordt in het bekende Audio CD formaat beschreven en is dus door iedere "normale" CD-speler te lezen. Daarnaast bevat de schijf een semi-reflecterende laag die in hoge dichtheid formaat wordt beschreven en waar dus veel meer gegevens op passen. Deze laag kan alleen afgespeeld worden op CD-players die het Super Audio CD formaat ondersteunen. Op deze laag wordt in principe dezelfde muziek opgenomen. Alleen wordt gebruik gemaakt van een volledig vernieuwd sampling-procédé en kan extra informatie verstuurd worden, zoals meer-kanaals informatie, teksten en grafieken.

Beveiliging

De Super Audio CD is uitgerust met geavanceerde kopierbeveiligingssystemen, die de massale kopierdrift die dank zij het goedkoper worden van CD-R's en dito branders de industrie teistert, de kop moet indrukken. De schijfjes zullen voorzien worden van zowel zichtbare als met het blote oog onzichtbare watermerken, die een dam zouden moeten opwerpen tegen het kopiëren. Daarnaast bevat de coderingstechniek van de audio-gegevens een paar gemene valkuilen, die het voor de zelf-kopieerders althans eventjes vervelend zouden moeten maken om een kopie van een Super Audio CD te trekken. Deze kopieerbeveiliging gaat door het leven met de naam "PSP", letterwoord voor "Pit Signal Processing". Deze techniek voegt een digitaal "watermerk" toe aan de op de schijf opgenomen gegevens, zonder dat de kwaliteit van de audio-gegevens wordt aangetast.

LEES OOK:
Hoofdstuk 3/15.6
Hoofdstuk 5/7.1
Hoofdstuk 5/7.3
Hoofdstuk 5/20.1



7.7 SACD, de Super Audio CD

Presentatie

Philips en Sony hebben de "SACD" gelanceerd op de Amerikaanse "HiFi 98"-beurs in juni in Los Angeles. Er werden demonstraties gegeven van de extra mogelijkheden en kwaliteit. Drie Amerikaanse audiolabels, namelijk "Digital Music Products", "Mobile Fidelity Sound Lab" en "Telard International" en het toen nog tot het Philips-concern behorende "PolyGram" demonstreerden de eerste opnamen op het nieuwe formaat.

Een van de eerste commerciële producten die op de markt zal komen is het album "Alto", geproduceerd door "DMP Records", dat muziek zal bevatten van de jazz-musicus Joe Beck en de fluitist Ali Ryerson.

Diverse fabrikanten hebben inmiddels aangekondigd het nieuwe audio-formaat te ondersteunen. Sony, Philips, Marantz em Accuphase plannen de eerste SACD-speler in de loop van 1999 op de markt te brengen. Daarnaast hebben diverse fabrikanten aangekondigd binnenkort op de markt te komen met betaalbare coders en decoders voor de nieuwe DSDT-codering (zie verder), die de basis vormt van het SACD-systeem.

De technologie

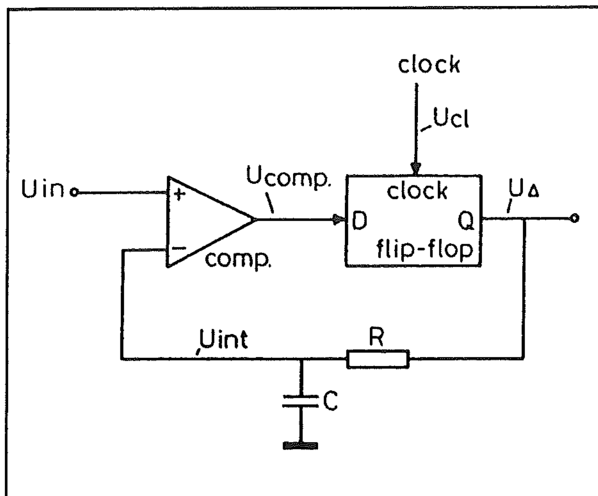
Wat maakt de Super Audio CD nu zo bijzonder? In één woord: DSDT, letterwoord van "Direct Stream Digital Technology". Een nieuwe methode om analoge signalen om te zetten in digitale datastromen. DSDT sampelt het analoge signaal met de verbluffend hoge samplingrate van 2,8224 MHz, hetgeen een bandbreedte belooft van meer dan 100 kHz en een dynamisch bereik van 120 dB. Ter vergelijking: de "oude" Audio CD technologie werkt met een sampling-rate van 44,1 kHz, heeft een bandbreedte van 20 kHz en een dynamisch bereik van 96 dB. De vraag kan gesteld worden hoe men deze nieuwe specificaties heeft vastgesteld. Bekend is dat het Audio CD formaat de echte "werkelijksheidsweergave"-fanaten nooit heeft kunnen bekoren. Gesteld werd dat de bandbreedte van 20 kHz en het dynamisch bereik van 96 dB absoluut geen recht deed aan de opnamemogelijkheden van de analoge technologie. In studio's werd immers gewerkt met analoge recorders die de band met een snelheid van 76 cm per seconde langs de koppen voerden en met gemak een bandbreedte van 50 kHz konden registreren en dat met een dynamisch bereik van 120 dB. Dergelijke kwalitatief hoogstaande opnamen werden dus "onthoofd" om te passen in de beperkte bandbreedte en dynamisch bereik van de Audio CD. Met de introductie van "DSDT" kunnen deze criticasters althans wat deze punten betreft geen kritiek meer hebben op digitale registratie van analoog geluid. De capaciteiten van het systeem overtreffen de specificaties van de allerbeste analoge registratie-technieken.

Direct Stream Digital Technology

Bij het digitaliseren van de audio-stromen bij de Audio CD wordt met een multi-bit systeem gewerkt. Ieder analoog sample wordt door middel van een analoog naar digitaal omzetter omgezet in een datawoord van 16 bit. Bij de Super Audio CD wordt met dit systeem gebroken. DSDT werkt met slechts één bit kwantisatie, de kwaliteit wordt verzekerd door de aftastfrequentie te verhogen tot 2,8224 MHz. Het grote voordeel van dit systeem is dat bespaard kan worden op codeerschakelingen en digitale filters en het opnamecircuit volledig "schoon" blijft. Het basisprincipe van de digitalisering is getekend

7.7 SACD, de Super Audio CD

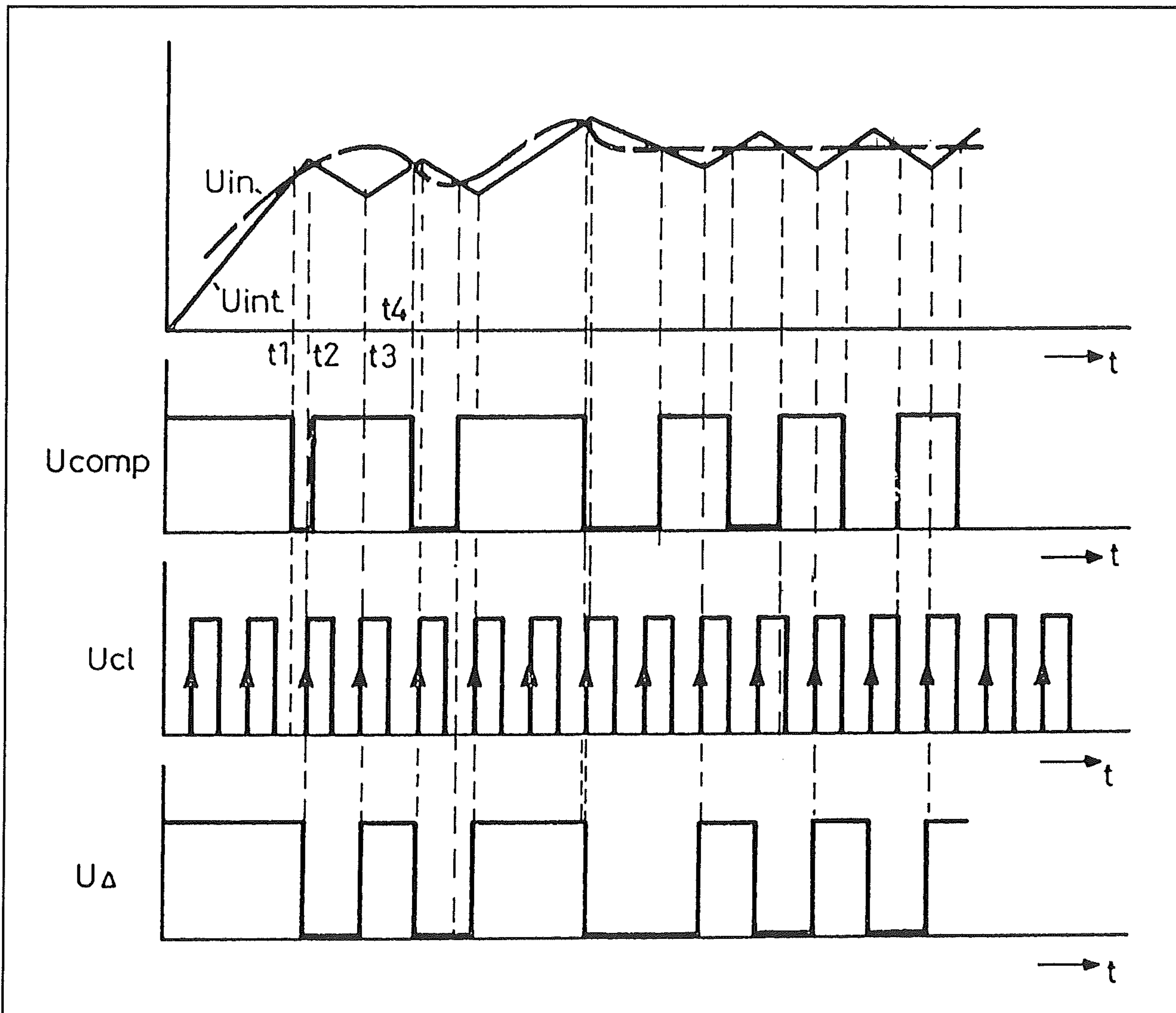
in figuur 5/7.7-1 en staat bekend onder de naam "Delta-Sigma" omzetting. Deze schakeling vormt een serieel werkende analoog naar digitaal omzetter.



Figuur 5/7.7-1: Het basis-principe van een "Delta-Sigma"-omzetter.

Een continu variërende analoge spanning wordt omgezet in een seriële pulstrein. De breedte van de pulsen is echter niet constant, maar afhankelijk van het verloop van de analoge spanning. Als deze stijgt zal de Delta-Sigma modulator zijn uitgangsspanning van "L" naar "H" sturen. Er ontstaat dus een stijgende flank als de ingangsspanning stijgt.
Als de ingangsspanning daalt zal de uitgang van de modulator van "H" naar "L" gaan. Een dalende ingangsspanning veroorzaakt dus een dalende flank.
Als de ingangsspanning constant blijft zal het uitgangssignaal van de Delta-Sigma modulator zeer snel omschakelen van "L" naar "H" en vice versa. Er ontstaan dan zeer smalle symmetrische pulsen, in feite dus een gewone blokgolf.
Een van de principiële voordelen van de Delta-Sigma modulator is dat de schakeling kan werken zonder sample-and-hold. Men kan een snel variërende analoge spanning aan de ingang leggen en de uitgangsspanning van de modulator zal een pulstrein opwekken waarbij de verhouding tussen de "L"- en de "H"-pulsen de digitale vertaling is van het variërende verloop van de ingangsspanning.
De analoge ingangsspanning wordt aangeboden aan de niet-inverterende ingang van een zeer snelle comparator COMP. De uitgang van deze schakeling stuurt een type D flip-flop. De clock-ingang van deze schakeling wordt gestuurd met een externe puls die de snelheid van het systeem bepaalt. De Q-uitgang U_Δ van de flip-flop stuurt een integrator die is samengesteld uit de weerstand R en de condensator C. De uitgangsspanning van deze integrator U_{int} stuurt de inverterende ingang van de comparator.
Er wordt dus een in zichzelf teruggekoppeld systeem gevormd, waarvan de werking wordt toegelicht aan de hand van de grafieken in figuur 5/7.7-2.
Maar allereerst moet iets gezegd worden over de werking van een type-D flip-flop. Bij iedere positieve flank op de clock-ingang kijkt de schakeling naar de logische waarde van het signaal op de D-ingang. De Q-uitgang zal op dat moment de logische waarde van D overnemen en deze waarde blijft in de flip-flop opgeslagen tot er op de D-ingang een tegengesteld logisch signaal wordt ontvangen. Bij de volgende clock-puls wordt deze waarde in de flip-flop opgeslagen en wordt de Q-uitgang geïnverteerd.
Bij het inschakelen van de voedingsspanning is de spanning over de integrator-condensator uiteraard gelijk aan nul. De ingangsspanning heeft op dit moment een bepaalde positieve waarde. De spanning op de niet-inverterende ingang van de comparator is dus groter dan deze op de inverterende ingang.

7.7 SACD, de Super Audio CD



Figuur 5/7.7-2: De werking van een Delta-Sigma modulator wordt toegelicht aan de hand van deze grafieken.

De uitgang van de comparator wordt "H". Deze logische waarde verschijnt op de D-ingang van de flip-flop en wordt bij de eerste stijgende flank van het clock-signaal in de flip-flop geclocked. De Q-uitgang van de schakeling, tevens de uitgang U_{Δ} van de Delta-Sigma modulator wordt bijgevolg "H".
Deze hoge spanning gaat de condensator C via de weerstand R opladen. De spanning op de inverterende ingang van de comparator gaat dus langzaam stijgen. Op tijdstip t1 wordt deze spanning gelijk aan de waarde van de ingangsspanning. De comparator klapt om, de uitgang wordt gelijk aan "L".
Op tijdstip t2, bij de volgende actieve flank van de clock, wordt deze nieuwe waarde van D in de flip-flop opgenomen. De uitgangsspanning van de schakeling gaat dus ook naar "L".
Het gevolg is nu dat de integratie-condensator via de weerstand gaat ontladen naar het massapotentiaal op de uit-

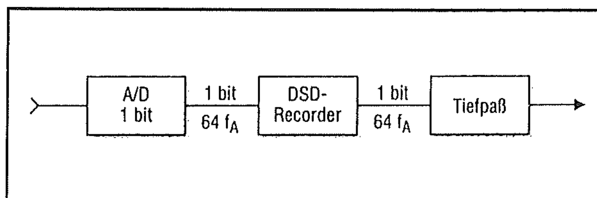
7.7 SACD, de Super Audio CD

gang van de schakeling. De spanning op de inverterende ingang van de integrator daalt, met als gevolg dat deze schakeling dadelijk omklapt omdat de ingangsspanning nog steeds stijgende is en de spanning op de niet-inverterende ingang groter is dan de spanning op de inverterende ingang. D wordt dus weer "H".
Bij de volgende actieve flank van de clock (tijdstip t3) wordt deze waarde weer in de flip-flop ingelezen. De uitgangsspanning van de schakeling U_Δ wordt weer "H". De condensator gaat weer opladen, de spanning op de inverterende ingang van de comparator gaat stijgen. Op deze manier zorgt de teruggekoppelde schakeling ervoor dat de spanning op de inverterende ingang van de comparator een zo goed mogelijke benadering wordt van de ingangsspanning.
Als de ingangsspanning constant blijft (rechter gedeelte van de grafieken) zal de flip-flop op het ritme van het clock-signaal steeds omklappen en zal de spanning op de inverterende ingang van de comparator driehoekvormig schommelen rond de constante waarde van de ingangsspanning. Aan deze laatste eigenschap dankt de schakeling haar naam. De Griekse letter Δ heeft een driehoekvorm!
Het zal duidelijk zijn dat de nauwkeurigheid waarmee een Delta-Sigma modulator werkt in hoofdzaak afhankelijk is van de snelheid van de clock. Hoe sneller deze werkt, hoe sneller het systeem reageert op veranderingen in de momentele waarde van de ingangsspanning.

Het demoduleren van een Delta-Sigma gemoduleerd signaal
Na verwerking en registratie op een SACD-schijfje moet het Delta-Sigma gemoduleerde signaal weer omgezet worden in een analoge spanning. Uit het principe van de modulator volgt in feite reeds hoe dat kan. De integrator R-C zet de uitgangsspanning van de Delta-Sigma modulator om in een analoge spanning die de analoge ingangsspanning zo goed mogelijk benadert. Het volstaat dus de gemoduleerde spanning door een identieke integrator te sturen om de spanning na te bootsen die verschijnt op de inverterende ingang van de comparator in de modulator. Het zal duidelijk zijn dat deze eenvoudige terugwinning van een Delta-Sigma gemoduleerd signaal niet in geringe mate bijdraagt aan de eenvoud van het systeem!
Door een zeer doordachte samenstelling van de integrator kan men er zelfs voor zorgen dat de kwantiseringsruis, die nu eenmaal altijd optreedt als een gedigitaliseerd analoog signaal weer wordt omgezet in een analoog signaal, minimaal is. Op deze manier is men in staat de signaal/ruis-verhouding zo groot te maken dat het dynamisch bereik van de Super Audio CD maximaal 120 dB bedraagt. Die waarde geeft de logaritmische verhouding tussen de maximale signaalamplitude en de minimale signaalamplitude die het systeem kan weergegeven.

Samenvatting
Het volledige proces van analoog signaal naar digitale code (fabricage) en weer terug van digitale code naar analoog signaal (afspeler) kan dus heel eenvoudig voorgesteld worden door het blokschema dat in figuur 5/7.7-3 is getekend.
Door de hoge sampling-frequentie en het gekozen Delta-Sigma principe lijkt de digitale seriële stroom in feite iets op een analoog signaal. Wie de pulsjes in vertraagd tempo voorbij zou zien racen, zou uit de opeenvolging van "L"- en "H"-signalen een goed idee krijgen over

zowel de frequentie- als de amplitudesamenstelling van het analoge signaal. De eenvoudige, zuivere integrator-manier, waarmee het analoge signaal gereconstrueerd wordt uit de seriële data-stroom laat weinig te wensen over. Critici van de Audio CD, die beweerden en beweren dat door het digitaliseren van analoge audio er per definitie klankkwaliteit verloren gaat, zullen het zwaar krijgen om hun kritiek te handhaven bij de Super Audio CD. Simpelweg integreren, immers, is een techniek die ook bij analoge verwerking van audio-signalen veelvuldig wordt toegepast, bijvoorbeeld bij allerhande soorten filters.

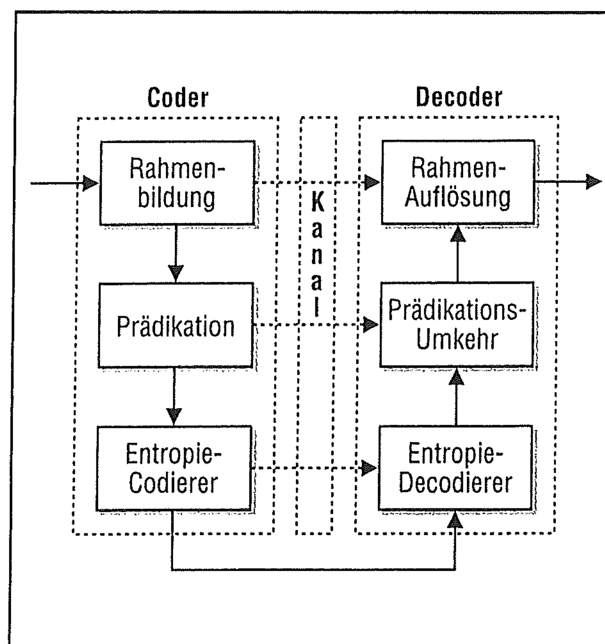


Figuur 5/7.7-3: Het wel zeer eenvoudige blokschema van de principiële werking van een Super Audio CD.

Verliesloze compressie

Er mag dan wel een één bit brede datastroom ontstaan, maar als gevolg van de hoge clock-frequentie levert één seconde muziek tot nog altijd een heleboel enen en nullen op: in het maximale geval 2.822.400 om precies te zijn! Zonder compressie zou er te weinig ruimte op de schijf zijn om een acceptabele hoeveelheid muziek op te slaan.
Dit is dus het tweede grote verschil tussen de klassieke Audio CD en de Super Audio CD. Bij de Audio CD is er geen sprake van compressie. Alle digitale stromen, die uit de analoog naar digitaal omzetter komen, worden op de CD gezet. Bij de Super Audio CD gebeurt dit dus niet.

Er is gekozen voor een compressie-algoritme dat volledig verliesvrij werkt. Men noemt dit ook wel "lossness"-compressie. Dat wil zeggen dat in de afspeler de compressie volledig ongedaan kan worden gemaakt en dan de originele digitale datastroom ontstaat. De Super Audio CD volgt hier dus niet de paden die bijvoorbeeld wel bij Video CD en DVD gevolgd worden. Hier wordt natuurlijk ook gecomprimeerd, maar er wordt met verlies gewerkt. In de afspeler kan nooit ofte nimmer de originele analoge audio- en video-signalen teruggewonnen worden. Ook hier hebben de systeemontwerpers dus hun best gedaan om alle eventuele kritiek op het systeem van "HiFi"-fanaten te smoren. Niemand kan zeggen dat er op een Super Audio CD verminkte muziek staat!
Het principe van de verliesloze compressie is getekend in figuur 5/7.7-4.



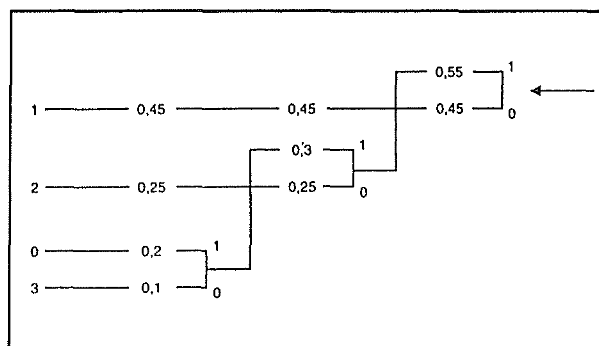
Figuur 5/7.7-4: Het principe van de datacompressie bij de Super Audio CD.

7.7 SACD, de Super Audio CD

De datastroom die maximaal uit 2.822.400 pulsen bestaat wordt opgesplitst in frames. Ieder frame bevat ongeveer 37.637 bits en er worden dus 75 frames per seconde gevormd. Ieder frame wordt vergeleken met bit-samenstellingen die in een "Predictie"-tabel zijn opgeslagen en bepaalde bit-volgorde worden vervangen door minder complexe codes, die in de tabel staan. Het zal duidelijk zijn dat op deze manier niet al te veel data-reductie wordt verkregen. Toch heeft deze code-omzetting een belangrijke functie. In de "Predictie"-tabel staan namelijk codes, die zich bijzonder goed lenen om via de daarop volgende entropie-codering in omvang gereduceerd te worden.

De entropie-codering

Deze codering wordt tegenwoordig vaak toegepast en werkt als volgt. Bij deze zogenoemde "Huffmann"-codering wordt een seriële data-stroom onderzocht op het statistisch voorkomen van bepaalde codes. Codes die het vaakst aanwezig zijn worden nadien gecodeerd met slechts één bit. Codes die iets minder vaak aanwezig zijn worden gecodeerd met twee bits. De code die het minst aanwezig is wordt gecodeerd met de langste binaire code die het algoritme toelaat. Een en ander wordt toegelicht aan de hand van figuur 5/7.7-5. De cijfers 1 tot en met 3 staan voor aangevoerde codes. De hardware onderzoekt nu de procentuele aanwezigheid van deze codes in de datastroom. Code 1 is 45 % aanwezig, code 3 slechts 10 % (tweede kolom). De twee codes die het minst vaak voorkomen krijgen nu de bits "0" en "1" toegewezen en worden nadien gecombineerd. Hun gezamenlijke aanwezigheid bedraagt 30 %, waardoor zij opschuiven naar de tweede plaats (derde kolom). Nu wordt aan de twee codes die het minst vaak voorkomen weer een "0" en "1" toegekend, nadien worden de codes weer verenigd, hetgeen in het getekend voorbeeld een voorkomen van 55 % oplevert. Deze code komt nu dus het vaakst voor, zodat zij oprukt naar de eerste plaats (vierde kolom). Ook nu wordt weer "0" en "1" toegekend. In dit eenvoudige voorbeeld, waar slechts vier mogelijke codes worden onderzocht, beëindigt het Huffmann-algoritme het voorbereidend werk. De omcodering wordt in een matrix opgenomen en de datastroom wordt een tweede maal doorlopen, waarbij de omcodering tot stand komt.



Figuur 5/7.7-5: De entropie-codering vervangt lange bit-volgorden door veel kortere.

Komt de hardware code "1" tegen, dan wordt deze gecodeerd door een enkelvoudig bit "0". Daarbij maakt het niet uit hoe lang code 1 is! Komt het systeem code 2 tegen, dan wordt dit omgezet in de bit-volgorde "1-0".
In het getekende voorbeeld wordt code 3 omgezet in de langste bitcombinatie, namelijk "1-1-0". De Huffmann-codes worden dus van rechts naar links samengesteld door de boomstructuur te volgen van het rechter eindpunt tot aan de betreffende code. Het zal duidelijk zijn dat dit systeem een grote datareductie tot gevolg heeft.

7.7 SACD, de Super Audio CD

De totale compressie
Het veranderen van de originele digitale data-stroom door middel van de "Predictie"-tabel en het nadien loslaten van een entropie-codering op de resultaten kan in het gunstigste geval een data-reductie van 50 % opleveren.

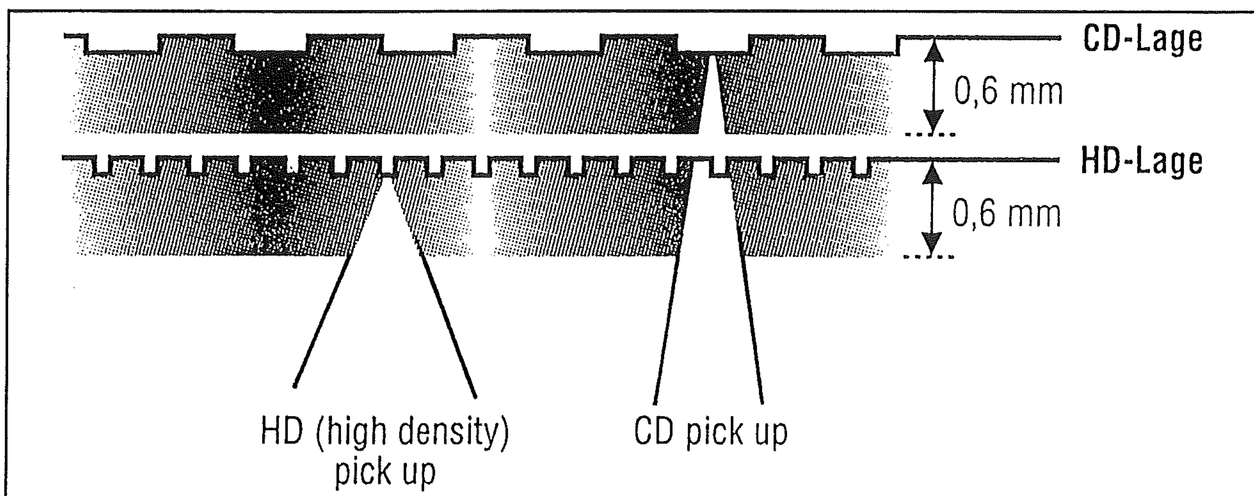
Techniek in de SACD-speler
Het zal duidelijk zijn dat de van de SACD-schijf gelezen digitale gecomprimmeerde datastroom weer heel eenvoudig omgezet kan worden in de originele codering. Het enige dat hiervoor noodzakelijk is, is dat in de afspeler tabellen aanwezig zijn die de entropie- en predictie-tranformaties weer ongedaan kunnen maken. Er gaat dus geen bitje van het originele signaal verloren!

Het op schijf zetten van de gegevens
Er staan nu twee data-stromen van de muziek ter beschikking. Enerzijds een datastroom die op de "normale" CD-manier digitaal gecodeerd is en die op geen enkele manier afwijkt van de manier waarop normale Audio CD's worden beschreven. Op de tweede plaats de speciale datastroom van het Super Audio CD formaat, die op de in dit hoofdstuk beschreven manier werd gecodeerd. Hoe nu deze twee data-stromen op één schijfje te zetten?
Hiervoor wordt gebruik gemaakt van de technieken en principes die ontwikkeld zijn bij het DVD-systeem. DVD's beschikken namelijk over twee data-lagen, die ***boven elkaar*** liggen. Bij DVD-schijfjes worden die twee lagen beschreven met DVD-gecodeerde gegevens.
Bij de Super Audio CD wordt één laag beschreven met de Audio CD gegevens en de tweede met de Super Audio CD gegevens.

Twee dragers met een dikte van 0,6 mm worden samengeperst en gelijmd tot een plaatje met de normale CD-dikte van 1,2 mm ontstaat, zie figuur 5/7.7-6. De onderste laag heeft echter een half doorlatende reflecterende laag, zodat het mogelijk is dat het infrarode licht dat door de pick-up van een Audio CD speler wordt uitgezonden door deze laag heendringt en de onderste laag belicht. Het is dan ook deze onderste laag die met de normale Audio-CD gegevens beschreven wordt.
Plaatst men een Super Audio CD in een normale Audio CD speler, dan zal de pick-up zijn licht met een golflengte van 780 nm op de onderkant van de 1,2 m dikke schijf richten en zich daar op focusseren.
Weliswaar zorgt het twee maal doordringen van de half transparante laag voor intensiteitsverlies, maar blijkbaar is dit verlies zo klein dat de Audio CD speler er geen last van heeft. Die onderste laag bevat op de normale manier maximaal 650 MB aan gegevens.

De schijf in de Super Audio CD speler
Legt men een Super Audio CD in een speciale afspeler, dan wordt de laserstraal in de pick-up, die nu een golflengte van 650 nm heeft, gefocusseerd op een diepte van 0,6 mm.
Deze straal tast dus de informatie af, die opgeslagen is in de half transparante laag die in het midden van het schijfje ligt. Op deze laag met hoge informatie-dichtheid (HD) worden de gegevens nu in het beschreven Super Audio CD formaat geschreven. Deze laag kan ongeveer 4,7 GB gegevens bevatten. Omdat de golflengte van het toegepaste laser-licht kleiner is, kunnen de putjes immers veel dichter bij elkaar liggen en bovendien ook veel korter zijn.

7.7 SACD, de Super Audio CD



Figuur 5/7.7-6: De doorsnede door een Super Audio CD.

Twee soorten registratie

De immense opslagcapaciteit van 4,7 GB en de toegepaste compressie-technieken laten toe veel meer dan 74 minuten audio op de "High density"-laag op te nemen. Nu was het echter niet de bedoeling dat bezitters van een oude CD-speler minder muziek zouden horen dan de bezitters van een Super Audio CD afspeler. De "volledige compatibiliteit" zou dan een lachertje zijn. Vandaar bevat de HD-laag ook maar maximaal 74 minuten muziek, maar die staan in twee versies op de laag geregistreerd.

De eerste versie bevat het normale stereosignaal, maar dan natuurlijk wel op de beschreven manier met Delta-Sigma modulatie gedigitaliseerd.

De tweede versie bevat zes kanaals informatie, die gebruikt kan worden in de "Surround Sound" systemen die nu steeds meer op de markt komen. Het zal duidelijk zijn dat als een dergelijk schijfje op een normale CD-afspeler word afgedraaid deze informatie niet beschikbaar is.

Maar, in de praktijk blijkt dat hiermee de HD-laag nog niet vol is. Men kan dus teksten, grafieken en zelfs een paar minuten video opnemen. Of hiervan in de praktijk gebruikt zal worden gemaakt is maar de vraag. Immers, ook de aloude Audio CD kan in principe meer informatie opnemen dan alleen maar gedigitaliseerde muziek. Ook bij dit systeem is de mogelijkheid geschapen teksten en zeer rudimentaire vormen van grafiek op te nemen. Toch hebben deze opties zich nooit doorgezet en er zijn, voor zover bekend, geen CD-spelers op de markt gebracht die deze mogelijkheden ondersteunen.

Of dat bij de Super Audio CD anders zal gaan, zal de toekomst uitwijzen.

Nog meer mogelijkheden

De ontwerpers van het systeem hebben nog een paar geraffineerde opties ingebouwd, die voornamelijk bedoeld zijn om het de software-fabrikanten naar de zin te maken. En als die zin in het systeem krijgen, dan bestaat de mogelijkheid dat zij hun muziek niet alleen als Audio CD maar ook als Super Audio CD op de markt gaan brengen. Met als gevolg dat er meer mensen zijn die de speciale spelers gaan kopen en de gehele industrie tevreden is.

De softwaregiganten beweren dat het illegaal kopiëren van Audio CD's onbeheers-

bare vormen aanneemt. Niet verbazingwekkend, want een CD-brander kost tegenwoordig minder dan *f* 500,00 en een beschrijfbaar schijfje is al voor *f* 3,00 te koop. Wie is dan zo gek om *f* 45,00 uit te geven voor een Audio CD?
Om te voorkomen dat het met de Super Audio CD dezelfde weg opgaat, zijn een paar gemene truukjes ingebouwd, die het leven van de kopieerders zo zuur mogelijk moet maken.

Anti-kopieer software
In de inleiding is reeds geschreven dat iedere schijfje zal worden voorzien van uitgekiende software die het kopiëren moet verhinderen. Nu is bekend dat ieder anti-kopieer systeem binnen de kortste keren gekraakt wordt en zo zal het met dit systeem ook wel gaan.

Digitaal watermerk
Vandaar dat de ontwerpers van het systeem een tweede mogelijkheid hebben ingevoerd om een "echte" Super Audio CD van een kopie te onderscheiden. In de data-ruimte die toch nog vrij is na het registreren van de twee- en zes-kanaals versies van de muziek en waar eventueel tekst, grafiek en video kan worden geregistreerd, kan als alternatief een "digitaal watermerk" worden aangebracht. Het unieke hiervan is dat dit watermerk ook met het blote oog zichtbaar is ***op de spiegelende zijde*** van het schijfje. Wie de spiegelende kant van een Audio CD bekijkt, ziet alleen wat regenboogachtige lichtreflecties, maar geen herkenbare dingen.
Door nu echter die vrije ruimte op de HD-laag met een speciale bitvolgorde te beschrijven zal de half reflecterende laag, gehouden in het daglicht, als gevolg van reflectie en interferentie, een duidelijk optisch herkenbaar patroon weerkaatsen!

Wie nu beweert dat het dan toch mogelijk moet zijn die speciale bitvolgorde ook op een illegale kopie op te nemen, schijnt bedrogen uit te komen. De ontwerpers beweren dat dit absoluut onmogelijk zal zijn, ook met de kopieer-hardware en -software die binnenkort op de markt komt. Of met andere worden: criminele organisaties die tienduizenden gulden kunnen besteden aan apparatuur zullen natuurlijk geen moeite hebben met het kopiëren van het watermerk, de man in de straat die het met zijn PC en ingebouwde DVD-ROM recorder moet doen, zal niet in staat zijn een "goede" kopie van een Super Audio CD te maken.
Hardware-fabrikanten zijn bezig systemen te ontwerpen, die alleen een Super Audio CD mét watermerk afspelen en op tilt slaan als dit kenteken ontbreekt.

Conditional Access
Als derde truukje is in de specificaties een zogenoemde "Conditional Access" gedefinieerd. Dat wil zeggen dat het mogelijk is bepaalde delen van de HD-laag ontoegankelijk te maken, tenzij men een speciale code ter beschikking heeft. Dit systeem is natuurlijk niet nieuw. Er zijn tal van CD-ROM's op de markt, waarbij van een dergelijk systeem gebruik wordt gemaakt. Een typisch voorbeeld zijn CD-ROM's met foto's. Men kan gratis een CD-ROM krijgen, waar als algemeen toegankelijk voorbeeld 20 foto's op staan. Via "Conditional Access" kan men daarnaast toegang krijgen tot duizenden foto's die "verborgen" op het schijfje staan. Wie een van die foto's wil openen, kan tegen betaling een software-sleutel bij de fabrikant aanvragen. Iets dergelijks kan dus ook met de Super Audio CD. Wie van dergelijke toepassingen gebruik gaat maken en waarvoor is op dit moment nog niet duidelijk.

7.7 SACD, de Super Audio CD

De commerciële toekomst
Op initiatief van Philips en Sony zijn de SACD-specificaties als bijlage opgenomen in het "Red Book", het boekwerk waarin alle technische details van Audio CD zijn beschreven.
Hard- en software-fabrikanten kunnen dus, na betaling van wat penningen aan de initiatiefnemers, aan aan de slag! Marantz wil de eerste SACD-afspelers medio 1999 in de Verenigde Staten op de markt brengen. Sony en Philips plannen hetzelfde voor Japan en Europa.
De vraag is echter of SACD een commercieel succes wordt. De meeste luisteraars zijn namelijk best tevreden met de kwaliteit die een normale Audio CD te bieden heeft. De bezwaren tegen de "digitale bijsmaak" van CD's worden slechts in een zeer kleine kring van zeer kritische luisteraars gehoord en de discussies gaan vaak esoterische richtingen op. Het soort mensen dat vindt dat men het verschil hoort tussen een luidspreker die met een normaal tweelingsnoer met een eindversterker is verbonden en een luidspreker die met een dik, verguld en peperduur snoer op dezelfde versterker is aangesloten! Dergelijke discussies zullen de gemiddelde luisteraar worst wezen!
Een tweede probleem is dat er binnenkort drie verschillende digitale audio-systemen op compact disk op de markt zijn: Audio CD, Super Audio CD en DVD-Audio. Zuiver technisch bekeken verslaat SACD met zijn specificaties de twee andere systemen volledig: 2,8224 MHz sampling-rate, vergeleken met 44,1 kHz voor Audio CD en (waarschijnlijk) 192 kHz voor DVD-Audio. Het probleem is echter dat er géén compatibiliteit gepland is tussen SACD en DVD. Een DVD-speler kan wel Audio CD's afspelen, maar zal niet in staat zijn SACD's ten gehore te brengen. De industrie wil van DVD dé standaard maken voor digitaal geluid en video. De commerciële positie van en de beoogde doelgroep voor de Super Audio CD is dus volledig onduidelijk. Bovendien, wie op dit moment het Internet afschuimt op zoek naar informatie over SACD (zoals de auteur van dit hoofdstuk heeft moeten doen) zal vaststellen dat dit nieuwe medium nu niet bepaald in de belangstelling staat.
Wordt SACD net zo'n technisch hoogstandje als Philips' DCC dat een zachte dood zal sterven? De toekomst zal het uitwijzen!

7.7 SACD, de Super Audio CD

5/7.8

Super Audio CD weergave-apparatuur

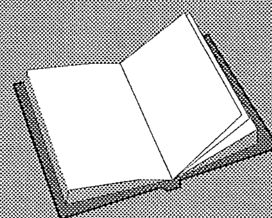
Inleiding

Van massa- naar elite-product
De introductie van het SACD-formaat door Sony en Philips in 1998 bezorgde alle fabrikanten van Hifi-apparatuur dromen over het ontsluiten van een geheel nieuwe markt. In die dromen zou iedereen die een CD-speler in huis had overschakelen naar apparatuur waarmee de SACD-schijfjes konden worden afgespeeld. Die droom is tot nu toe niet uitgekomen. De consument vindt in het algemeen de kwaliteit van de "oude" Audio-CD goed genoeg en bovendien is er te weinig aanbod aan software.
Vandaar dat de strategie van de marketing mensen werd veranderd. SACD wordt nu op de markt gezet als hét medium voor de veeleisende audiofiel, die geen genoegen neemt met de kwaliteit van Audio-CD en meer wil. SACD biedt deze extra kwaliteit, maar om deze audiofiel te verleiden tot de overstap naar het nieuwe medium is natuurlijk meer nodig: SACD-spelers, versterkers en luidsprekers die de kwaliteit van SACD volledig benutten. Een commercieel aantrekkelijke strategie, want het is dan niet langer noodzakelijk apparatuur tegen minimale prijzen op de markt te zetten, de beoogde doelgroep is immers bereid grote bedragen uit te geven. Ook een groot aanbod aan software is overbodig, de doelgroep heeft toch geen behoefte aan het populaire massa-genre.

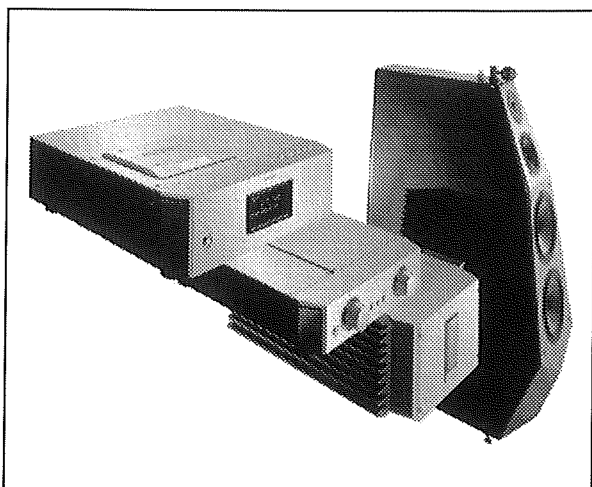
De strategie van Sony
Sony is de eerste fabrikant die deze nieuwe verkoopstrategie in de praktijk heeft gebracht. Reeds in juni 1999 werden vier "super high end" apparaten op de markt gebracht in een zeer gelimiteerde oplage van 500 exemplaren:
- de SCD-1 Super Audio CD Player;
- de TA-E1 Linear Phase Preamplifier;
- de TA-N1 Linear Phase Power Amplifier;
- het SS-M9ED 5-Unit Speaker System.

Doelstelling van het systeem, zie figuur 5/7.8-1, was het grote audiobereik van de SACD (tot 100 kHz), het grote dynamische bereik (105 dB) en de minimale

LEES OOK:
Hoofdstuk 5/7.1
Hoofdstuk 5/7.3
Hoofdstuk 5/7.4
Hoofdstuk 5/7.5
Hoofdstuk 5/7.7



vervorming ook in de hardware volledig tot recht te laten komen.
Het systeem werd medio 1999 voor (omgerekend) € 5.500,00 op de Japanse markt geïntroduceerd.



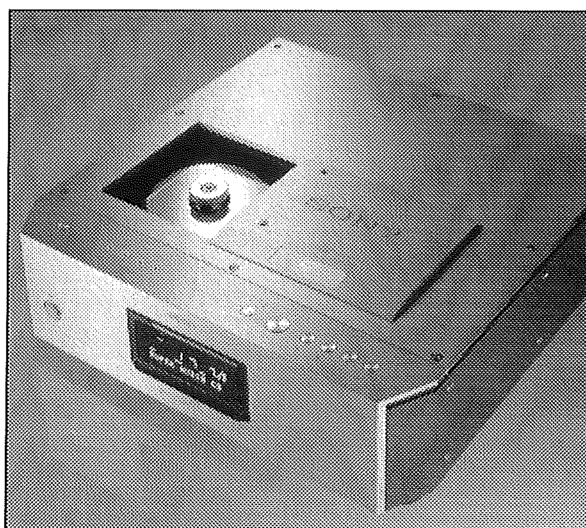
Figuur 5/7.8-1: De componenten van het "super high quality" SACD-systeem van Sony.

Of deze strategie commercieel succes heeft gehad is onbekend. Maar de innoverende technologieën die Sony in deze apparatuur heeft geïntroduceerd zijn maatgevend geweest voor de verdere ontwikkeling van weergave-apparatuur voor SACD in het bijzonder en audio-apparatuur in het algemeen en zijn een bespreking meer dan waard.

De SCD-1 SACD Player

Specificaties

De SCD-1 heeft een bijzondere vormgeving die doet denken aan de eerste generatie CD-spelers, zie figuur 5/7.8-2. Het apparaat is een bovenlader, een noodzaak vanwege de zeer speciale manier waarop het optische aftastsysteem werkt (zie later). Dat lijkt onhandig, maar dergelijke peperdure apparaten zijn natuurlijk niet bedoeld om zo onzichtbaar mogelijk weggestopt te worden in een kast, maar open en bloot tentoongesteld te worden. Vergelijk het maar met de aandacht die op dit moment wordt besteed aan de vormgeving van prijzige buizen eindversterkers. Dan is het bovenlader-principe niet zo'n nadeel.

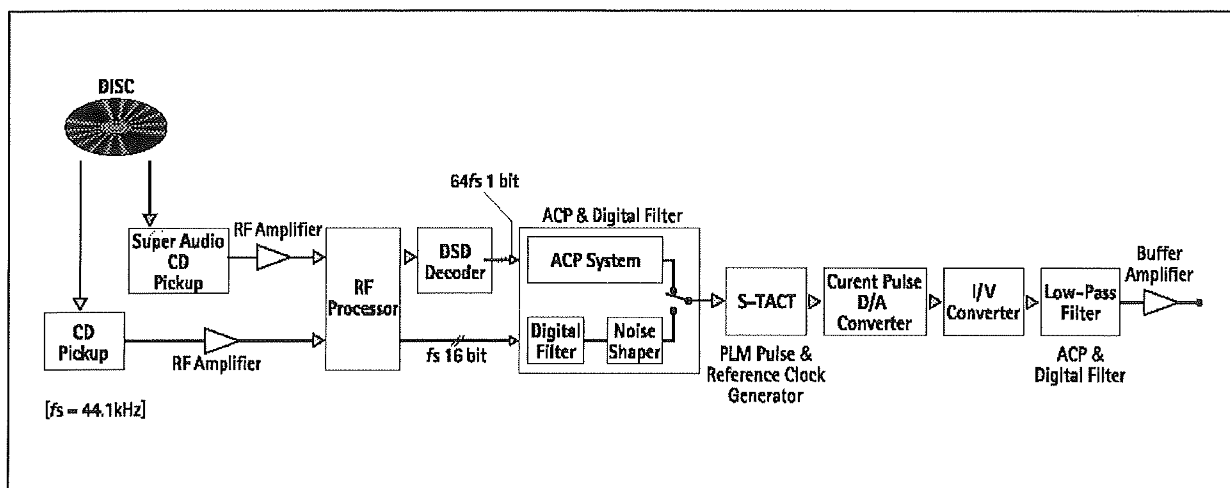


Figuur 5/7.8-2: De SCD-1 bovenlader van Sony.

De specificaties van het apparaat in het kort samengevat:

- aftastbereik:
  2 Hz tot 100 kHz
- frequentiebereik:
  2 Hz tot 50 kHz (-3 dB)
- dynamisch bereik:
  hoger dan 105 dB
- totale harmonische vervorming:
  minder dan 0,0012 %
- wow en flutter:
  minder dan 0,0001 % top-tot-top
- audio-uitgangen:
  - digitaal optisch: -18 dBm
  - digitaal coaxiaal: 0,5 $V_{top\text{-}tot\text{-}top}$
  - analoog ongebalanceerd: 2 $V_{effectief}$
  - analoog gebalanceerd: 4 $V_{effectief}$

7.8 Super Audio CD weergave-apparatuur



Figuur 5/7.8-3: Het blokschema van de SCD-1.

- afmetingen:
  43 x 14,9 x 43,6 cm^3
- gewicht:
  26,5 kg (sic!)

Nieuwe terminologie

Het is onvermijdelijk: iedere technische innovatie brengt een eigen terminologie met zich mee. Ook bij de SCD-1 schermt Sony met een heleboel nieuwe kreten, zoals:

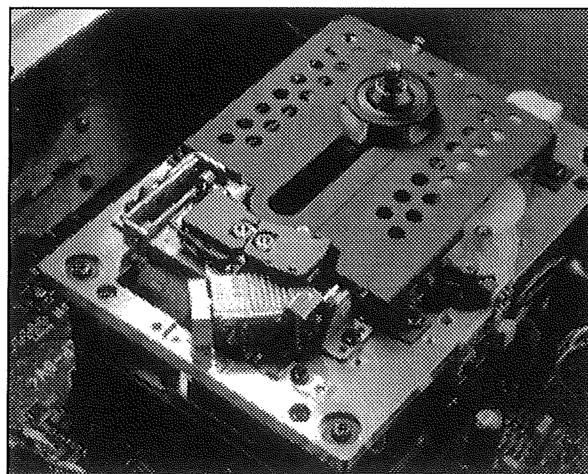
- RF Signal Processing:
- DSD-decoder voor SACD;
- ACP-systeem voor SACD;
- S-Tact;
- Current Pulse DAC;
- Advanced Capacity Variable Coefficient Digital Filter;
- GIC-Type laagdoorlaat filter.

In de volgende paragrafen zullen deze begrippen nader toegelicht worden. Aan de hand van het blokschema van figuur 5/7.8-3 kunnen we de functie van deze nieuwe technologieën al plaatsen.

Het loopwerk en de optische pick-up

Zoals bij iedere SACD-speler heeft ook de SCD-1 een dubbel uitgevoerde optische pick-up.

De eerste pick-up leest met een golflengte van 650 nm de gegevens op een SACD, de tweede leest met een golflengte van 780 nm de gegevens op een Audio-CD.



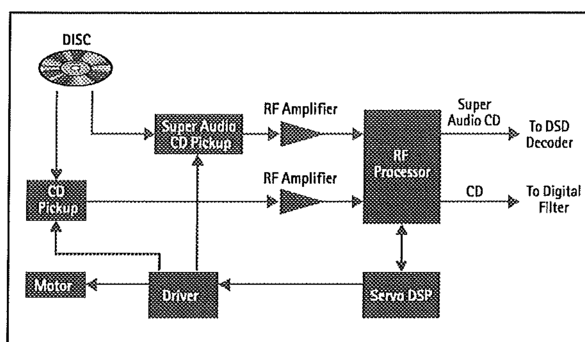
Figuur 5/7.8-4: Het mechanisme dat de CD heen en weer laat bewegen boven de vast opgestelde optische pick-up's.

Het unieke is dat het optische systeem en de gecombineerde pick-up's vast zijn opgesteld en dat de Audio-CD of SACD boven deze pick-up's heen en weer worden bewogen. In figuur 5/7.8-4 kan men deze constructie bewonderen. Boven op

de foto ziet u de spindel waarop de SACD of Audio-CD wordt geplaatst. Via de brede gleuf kan het schijfje heen en weer bewegen. Onder in beeld zijn de twee optische pick-up's te zien.
Sony heeft voor deze optie gekozen omdat de normale situatie, waarbij de schijf vast staat en de pick-up heen en weer beweegt, heel erg storingsgevoelig is. Er worden dus veel foutieve gegevens uitgelezen. Dat is niet erg, want iedere CD-speler is uitgerust met een uitgebreid hard- en software-systeem dat fouten vaststelt en de originele gegevens zo goed mogelijk uit de foutieve data reconstrueert. Maar wie streeft naar optimale kwaliteit probeert natuurlijk de bron van het probleem aan te pakken. Het gewicht van CD, spindel en rotatiemotor is natuurlijk veel en veel groter dan het gewicht van een optische pick-up. De grote massa zorgt ervoor dat de bewegende CD minder gevoelig is voor trillingen en andere oorzaken van het "ontsporen" van de pick-up.
Een andere methode die wordt toegepast om het uitlezen van de gegevens zo foutloos mogelijk te laten verlopen kennen wij uit het betere soort CD-spelers. Het chassis waarop het gehele systeem is gemonteerd bestaat uit een solide plaat van 6 mm dik aluminium, die verend is opgehangen via vier rubberen trillingsdempers. Kortom, de oude mechanica die succesvol werd toegepast in platendraaiers van de betere klasse wordt weer geactiveerd!

RF Signal Processing

De signalen die door de twee optische pick-up's worden geleverd, worden in een speciaal ontworpen HF-versterker verder verwerkt. Deze is gemonteerd op het aluminium chassis, zo dicht mogelijk bij de sensoren. Na versterking gaan de signalen naar de "RF Processor", waar de clock uit het signaal word bevrijd, het signaal wordt gedemoduleerd en de eerste foutcorrectie wordt toegepast. De RF Processor levert twee digitale uitgangsstromen, een die de SACD-gegevens bevat en een die de Audio-CD gegevens draagt. De RF Processor stuurt, zie figuur 5/7.8-5, een speciaal voor de SCD-1 ontworpen Digital Signal Processor (DSP) die de servosignalen genereert die de twee pick-up's op de datalaag van de schijf focusseren en die de motoren van de SA(CD)-slede aandrijft.

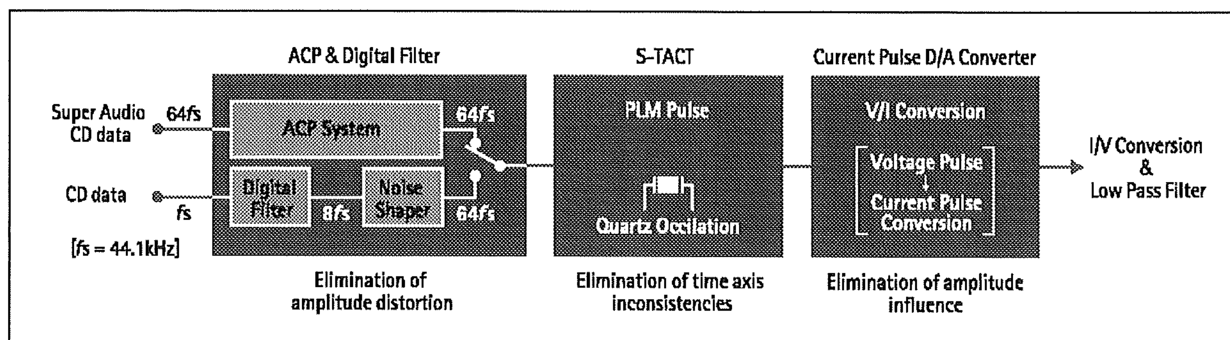


Figuur 5/7.8-5: De verwerking van de door de pick-up's gegenereerde signalen in twee HF voorversterkers en de RF Signal Processor.

DSD-decoder

De DSD-decoder (Direct Stream Digital) zet de door de RF Processor gegenereerde seriële SACD-datastroom om in twee seriële datastromen die alleen maar de audiogegevens bevatten. Het blokschema van deze decoder is voorgesteld in figuur 5/7.8-6. De DSD-decoder leest eerst het "watermerk" dat op iedere officiële SACD aanwezig is. Als deze gegevens geldig zijn begint de DSD- decoder met het decoderen van de inkomende gegevensstroom.

7.8 Super Audio CD weergave-apparatuur



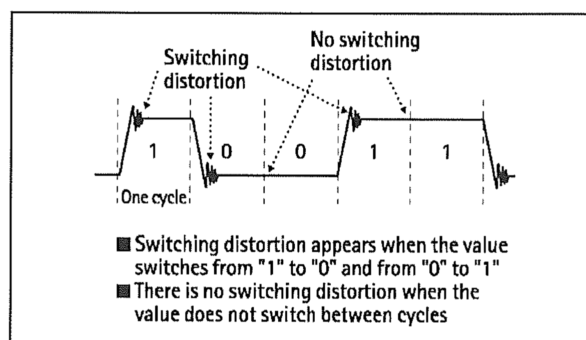
Figuur 5/7.8-6: Het blokschema van de DSD-decoder.

De ruwe gegevens van de SACD worden omgezet in een 1 bit brede seriële gegevensstroom waarmee later de digitaal naar analoog omzetter wordt gestuurd. De DSD-decoder is bovendien verantwoordelijk voor het decoderen van allerlei sub-codes, zoals de TOC-informatie, de track-nummers, de tijd en de eventueel aanwezige tekstuele gegevens.

ACP, Accurate Complementary Pulse Density Modulation

De DSD-decoder levert dus een datastroom, die is samengesteld uit “L” en “H” pulsen van verschillende breedte. De audio-informatie zit verborgen in de breedte van deze pulsen. Omdat deze pulsstroom in een één bit brede DAC naar een analoog signaal wordt omgezet is een zeer nauwkeurige pulsamplitude en pulsbreedte van het allerhoogste belang. Bij dergelijke omzetters is het immers de “inhoud” van de pulsen die maatgevend is voor de omzetting naar een analoog signaal. Hier ontstaat een probleem, dat “digitale vervorming” wordt genoemd. Digitale schakelingen hebben een bepaalde vertraging die zich uit in het ontstaan van duidelijk meetbare stijg- en daaltijden in het signaal op de uitgang. Bovendien ontstaan overshoots, oscillaties bij het begin van de “L”- en “H”-niveaus.

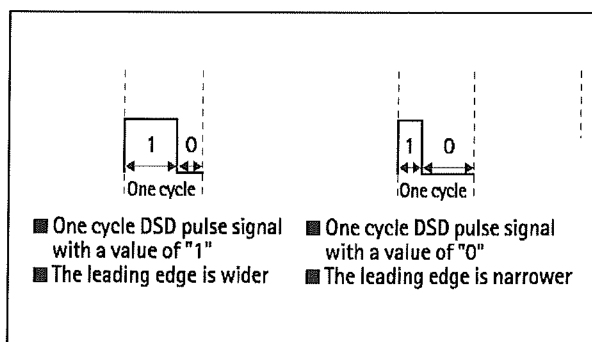
In figuur 5/7.8-7 is de reële uitvoer van de pulsstroom uit de DSD-decoder voorgesteld. Deze vervormingen zouden niet zo erg zijn, als zij constant waren. Maar dat is niet het geval. Uit de aard van het principe van SACD worden bijvoorbeeld twee hoge bits die achter elkaar in de datastroom voorkomen voorgesteld door één brede “H”-puls, zie rechts in de figuur. Deze bredere puls heeft evenveel overshoot en even grote stijg- en daaltijden dan een enkelvoudige puls. De effecten van beide verschijnselen zijn dus bij deze puls kleiner. Dit leidt zonder meer tot een niet-lineaire vervorming in het analoge uitgangssignaal.



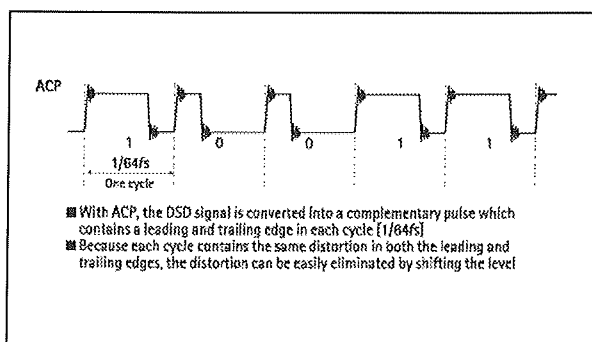
Figuur 5/7.8-7: “Digitale vervorming” ontstaat door de aanwezigheid van meetbare stijg- en daaltijden en door overshoot.

Om deze vervorming te bestrijden heeft Sony het “Accurate Complementary Pul-

se Density Modulation", kortweg ACP, geïntroduceerd. Bij dit systeem wordt de datastroom die uit de DSD-decoder komt en die bestaat uit pulsen die alle een breedte hebben die een veelvoud is van de basispulsbreedte, omgezet in qua breedte uitstekend gedefinieerde pulsen voor "L" en voor "H". Dit systeem is voorgesteld in figuur 5/7.8-8.



Figuur 5/7.8-8: Het omzetten van de pulstrein in pulsen met standaard breedten met het ACP-systeem.



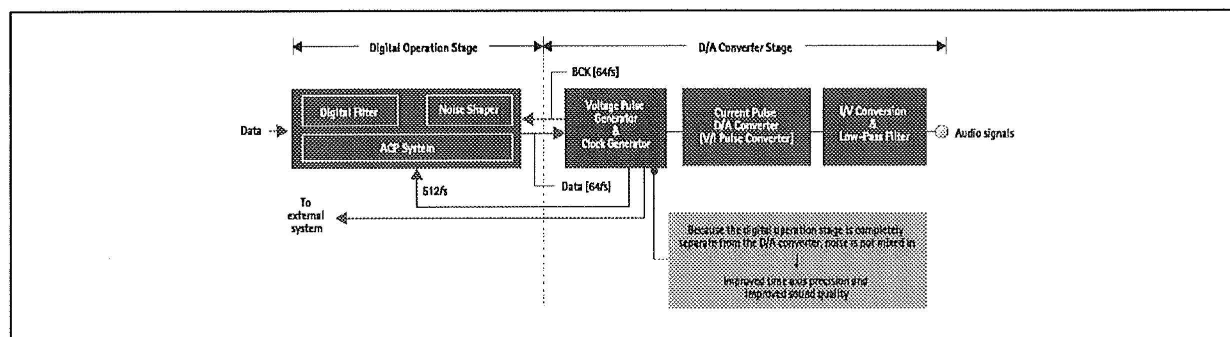
Figuur 5/7.8-9: Het signaal van figuur 5/7.8-7 na bewerking door de ACP-schakeling.

In figuur 5/7.8-9 is de pulstrein voorgesteld die de ACP levert. Als u dit plaatje vergelijkt met dat van figuur 5/7.8-7 (beide illustraties stellen dezelfde pulsvolgorde voor), dan stelt u vast dat twee opeenvolgende "H"-pulsen nu niet meer door één puls met dubbele breedte worden gerepresenteerd, maar door twee identieke pulsen. Hetzelfde geldt voor twee opeenvolgende "L"-pulsen. Het gevolg is dat iedere puls nu op dezelfde manier wordt geteisterd door stijg- en daaltijden en door overshoot. Deze twee "digitale vervormingen" vormen nu dus een constante factor in het uitgangssignaal en kunnen op een vrij eenvoudige manier worden gecompenseerd.

S-TACT Pulse Generator

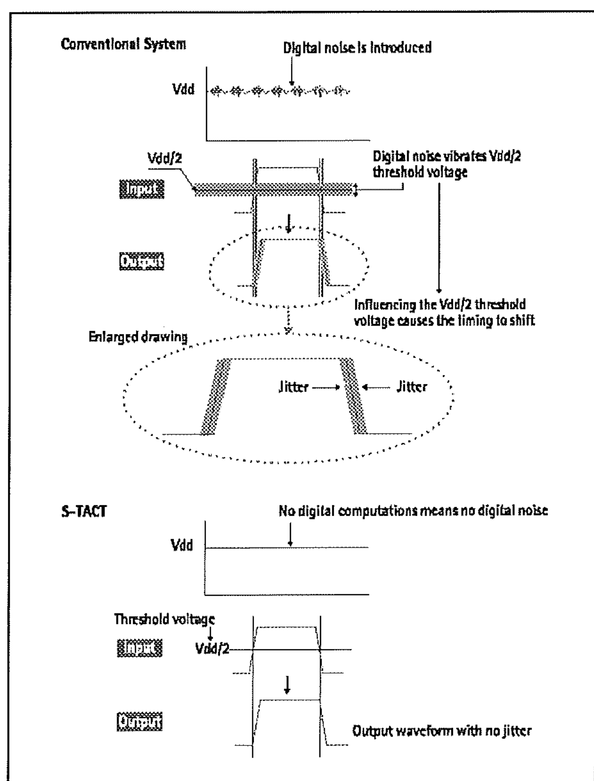
De "Synchronous Time Accuracy Controller", afgekort tot S-TACT, vormt de basis van het ACP-systeem. Hart van de schakeling is een clock-generator die word gestuurd uit een zeer nauwkeurige hoogfrequente kristaloscillator. De uitgangspulsen die uit het systeem komen hebben dus allemaal precies dezelfde breedte, waardoor de digitale vervorming wordt geminimaliseerd. Normale systemen werken met softwarematige oplossingen die de audiostroom reconstrueren uit de clock die in het SACD-signaal verborgen zit. Op deze klok kan echter digitale ruis zitten. Het gevolg is dat niet alle pulsen exact dezelfde breedte hebben en er dus digitale vervorming wordt geïntroduceerd. Het variëren van de breedte van de uitgangspulsen noemt men "jitter".
Het blokschema van het S-TACT systeem is weergegeven in figuur 5/7.8-10. De generatie van de uitgangspulsen wordt uitgevoerd met een frequentie die 512 keer hoger is dan de sampling frequentie van de SACD. Hierdoor wordt de breedte van de uitgangspulsen nog nauwkeuriger gereconstrueerd. Hoe de digitale ruis van invloed is op de breedte van de uitgangspulsen wordt nog eens heel mooi gedemonstreerd in de tekeningen van figuur 5/7.8-11.

7.8 Super Audio CD weergave-apparatuur



Figuur 5/7.8-10: Het blokschema van het S-TACT systeem.

Boven is de normale situatie weergegeven. Door de digitale ruis op het ingangssignaal van het systeem zal de breedte van de uitgangspulsen iets variëren, hetgeen zich uit in signaaljitter.



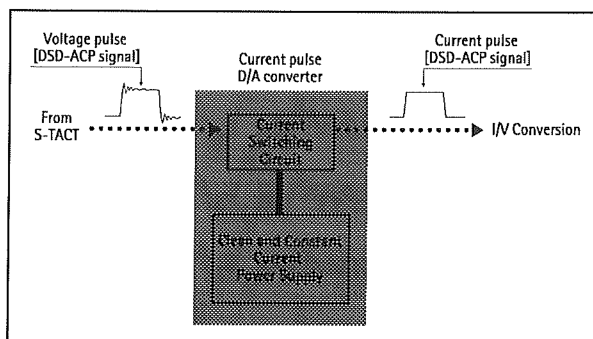
Figuur 5/7.8-11: De invloed van de digitale signaalruis op de jitter van het uitgangssignaal.

Door het toepassen van het S-TACT systeem (onderste tekening), waar de breedte van de uitgangspulsen wordt afgeleid uit de zeer stabiele kristaloscillator, zal er van breedte-jitter op de uitgangspulsen absoluut geen sprake zijn.

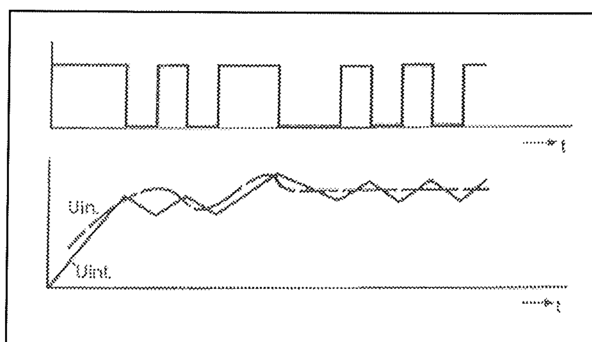
Current Pulse DAC

De uitgangssignalen van het ACP-systeem moeten nu omgezet worden in een analoog signaal. Hiervoor wordt een "Current Pulse DAC" ingeschakeld, zie figuur 5/7.8-12. De uitgangspulsen die uit de S-TACT komen hebben last van overshoots. In de Current Pulse DAC worden deze verschijnselen verwijderd. Basis is een uiterst stabiele constante stroombron, afgeleid uit een al even stabiele spanningsreferentie. De spanningspulsen die uit de S-TACT komen openen en sluiten een stroomschakelaar "Current Switching Circuit". De uiterst stabiele stroombron levert zijn stroom via deze stroomschakelaar aan de uitgang. Omdat de breedte van de pulsen door de S-TACT technologie uiterst nauwkeurig is vastgelegd en de grootte van de stroompulsen door de "Current Pulse DAC" uiterst stabiel wordt gehouden, zal het product pulshoogte maal pulsbreedte ook uiterst stabiel zijn.
Met andere woorden: er is voldaan aan de belangrijkste voorwaarde van een één bit brede omzetter. Als deze omzetter

wordt gestuurd met pulsen die een constante "inhoud" hebben, dan zal er minimale vervorming op het analoge uitgangssignaal ontstaan.



Figuur 5/7.8-12: De spanningspulsen uit de S-TACT worden via een constante stroombron omgezet in stroompulsen met niet alleen een constante breedte, maar ook een constante amplitude.



Figuur 5/7.8-13: De werking van het filter grafisch toegelicht.

Advanced Capacity Variable Coefficient Digital Filter

De stroompulsen die uit de Current Pulse DAC komen bevatten reeds de analoge audio-informatie. Die informatie zit verborgen in de "inhoud", dus in breedte maal hoogte, van de pulsstroom. Maar uiteraard is dit nog steeds een digitaal signaal. Omzetten in "echte" analoge informatie gebeurt door het signaal door een steil afsnijdend laagdoorlaat filter te voeren. Zo'n filter werkt in wezen integrerend, zoals duidelijk blijkt uit figuur 5/7.8-13. In de bovenste grafiek is de stroompulstrein voorgesteld die door de Current Pulse DAC wordt geleverd. In de onderste grafiek is de uitgangsspanning U_{int} getekend die uit het filter komt. In stippellijn is de oorspronkelijke analoge spanning U_{in} weergegeven. Duidelijk blijkt dat de uitgangsspanning van het filter de analoge spanning **benadert**. De stapvormige benadering is een fundamenteel kenmerk van ieder digitaal audio-systeem en daar kan ook het SACD-systeem met zijn superieure eigenschappen niets aan verhelpen.

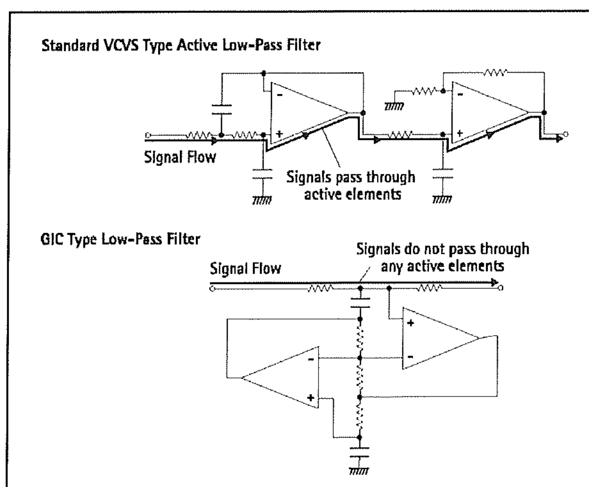
In de SCD-1 wordt gebruik gemaakt van een filter dat met een mondvol "Advanced Capacity Variable Coefficient Digital Filter" wordt genoemd, maar door het leven gaat als VC24. "VC", omdat wordt gewerkt met "variabele coëfficiënten". "24", omdat wordt gewerkt met een maximale woordlengte van 24 bit. VC24 is een heel ingewikkelde techniek die er in het kort op neer komt dat de processor kijkt naar de samenstelling van de binnenkomende stroompulsen. Is die samenstelling vrij eenvoudig, dan wordt een maximale lengte van 24 bit in een register ingelezen en wordt daarop de digitale filtering toegepast. Is de samenstelling vrij complex, dan worden er minder pulsen ingelezen en wordt op dit kleiner sample de digitale filtering toegepast. De capaciteiten van het systeem worden dus steeds volledig benut. Bovendien neemt de kwaliteit van het uitgangssignaal toe, want bij digitale filtering is het zo dat de kwaliteit van de analoge benadering groter wordt als het filter-algoritme op een groter monster kan worden toegepast.

7.8 Super Audio CD weergave-apparatuur

De VC24 werk bovendien met een achtvoudige oversampling in één bewerkingsstap, terwijl goedkopere systemen vaak met tweevoudige oversampling werken die drie keer wordt uitgevoerd. Ook dat schijnt de kwaliteit van de analoge benadering van het originele signaal te verhogen.

GIC-Type laagdoorlaat filter

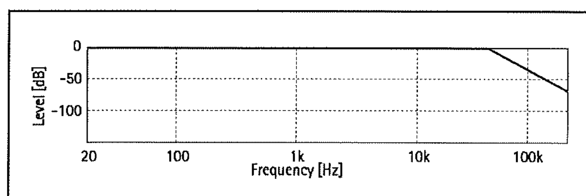
Het VC24-filter levert nog steeds een stroomuitgang. Dat heeft te maken met het feit dat men bij snelle signalen blijkbaar gemakkelijker stromen kan schakelen dan spanningen. Maar ooit moet die stroom natuurlijk toch worden omgezet in een spanning. Dat gebeurt in de volgende stap. Tot slot wordt de uitgangsspanning nog eens door een analoog laagdoorlaat filter gevoerd. Ook hier wordt voor een innovatieve oplossing gekozen. Bij het toegepaste GIC-Type filter wordt het signaal, zie figuur 5/7.8-14, niet door actieve componenten gevoerd.



Figuur 5/7.8-14: Het verschil tussen een normaal en een GIC-Type (onder) laagdoorlaat filter.

Het bovenste schema geeft de opbouw van een traditioneel laagdoorlaat filter weer. Het signaal gaat door twee operationele versterkers, die ieder een bepaalde vervorming en faseverschuiving introduceren. Bij het GIC-Type filter, zie onderste schema, staat het filter als **belasting** op de signaalweg geschakeld. Natuurlijk is dat geen zuiver Ohmse belasting, maar een belasting die toeneemt naarmate de signaalfrequentie stijgt. Hogere frequenties worden meer belast dan lagere, met als gevolg dat de hoge frequenties meer worden verzwakt dan de lagere. Die hoge frequenties, trouwens, zitten in het signaal als gevolg van de bemonstering die eigen is aan digitale systemen.

Op deze manier wordt het analoge signaal wél frequentie-selectief belast, maar niet extra vervormd. De bandbreedte van het GIC-Type filter is voorgesteld in figuur 5/7.8-15. Tot 50 kHz loopt de karakteristiek kaarsrecht, bij 100 kHz is de verzwakking echter al gestegen tot ongeveer -50 dB. Dank zij deze karakteristiek wordt de gehele hoorbare band tot 16 kHz, mét eerste en tweede harmonischen, onverzwakt doorgelaten, maar worden de hoogfrequente overblijfselen van de stapvormige benadering (resultaat van het sampling-proces) flink verzwakt.

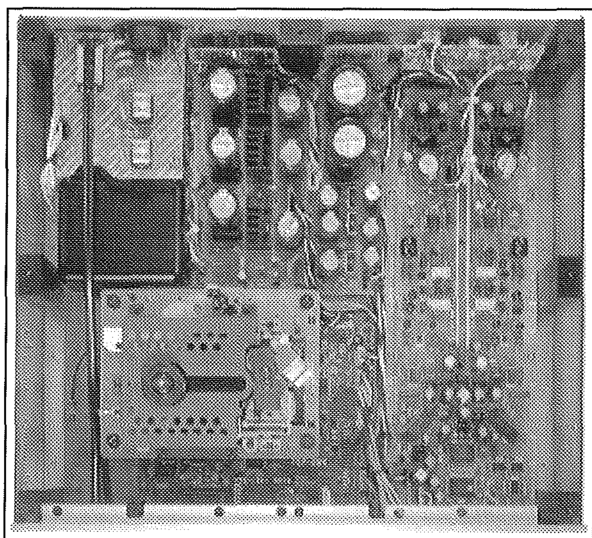


Figuur 5/7.8-15: De frequentieweergave van het GIC-Type filter.

Circuit Board Lay-out

Bij de SCD-1 is veel aandacht besteed aan de lay-out van de printen. In systemen waar zowel snelle digitale signalen

als laagfrequente analoge signalen voorkomen is dit een groot probleem. Hoe immers te voorkomen dat snelle digitale signalen via capacitieve koppeling op de print op gevoelige analoge printbanen terecht komen? De foto van figuur 5/7.8-16 geeft een overzicht van het inwendige van de SCD-1. Wat onmiddellijk opvalt is dat sommige IC's niet horizontaal of verticaal uitgelijnd op de print zitten, maar onder een schijnbaar willekeurige hoek. In de moderne tijd, waar printen met de computer worden ontworpen is dit een uniek gezicht. Maar dat is bewust gedaan, omdat uit uitgebreide tests en metingen is gebleken dat deze ongewone componentenplaatsing minimale paracitaire signaaloverdracht tot gevolg had.



Figuur 5/7.8-16: De interne lay-out van de SCD-1.

Sony is pagina's lang lyrisch over de manier waarop alle elektronische componenten zeer bewust op bepaalde plaatsen in het interne van hun SACD-speler zijn geplaatst. Om een lang verhaal samen te vatten: over iedere massaleiding, iedere voedingsaansluiting en iedere verbinding is nagedacht. En dit alles om de paracitaire koppelingen, inducties en andere nare effecten van print lay-out tot een minimum te reduceren. Zo worden bijvoorbeeld twee afzonderlijke voedingstrafo's met twee volledig gescheiden voedingen gebruikt voor het analoge en digitale deel. De analoge voeding is niet op de voedingsprint ondergebracht maar op de print die de analoge signalen verwerkt, zodat de impedantie tussen analoge voeding en analoge schakelingen minimaal is. Kortom, ook op dit vaak volledig verwaarloosde punt kan erg veel kwaliteitswinst worden bereikt!

De versterkers TA-E1 en TA-N1

Inleiding

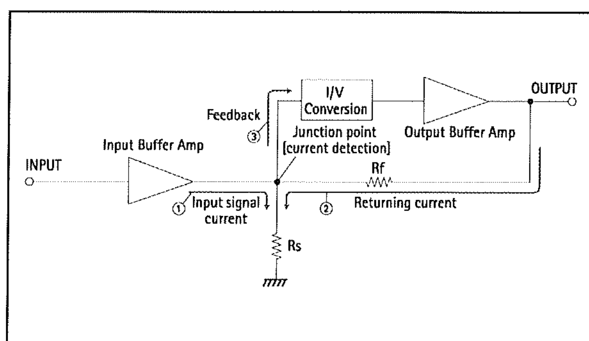
Beide versterkers werden ontworpen met het idee in het achterhoofd dat de superieure specificaties van de SCD-1 ook in de naversterking volledig tot hun recht moeten komen.

Een van de voornaamste kenmerken van beide apparaten is dat bewust werd afgezien van allerlei fratsen die moderne versterkers ontsieren. Geen infrarode afstandsbediening, geen digitaal nagemaakte speciale geluidseffecten, zelfs geen toonregeling. Maar wél twee apparaten met basale instellingen, zoals die twintig jaar standaard waren. Wat niet wil zeggen dat de technologie niet up-todate is. Zowel de voor- als de eindversterker werken volgens het principe van de "Linear Phase Technology", een techniek die vlakke bandbreedte en fasekarakteristieken tot meer dan 100 kHz garandeert.

Linear Phase Technology

Iedere versterker moet door middel van tegenkoppeling aan banden worden gelegd. Zonder tegenkoppeling zou de versterker bij de geringste verhoging van de omgevingstemperatuur onmiddellijk op hol slaan. Maar bovendien zorgt tegenkoppeling voor een vlakker amplitudeverloop en minder vervorming. Echter, de introductie van tegenkoppeling zorgt er vrijwel steeds voor dat de fasekarakteristieken van de schakeling slechter worden. Dit heeft de maken met het feit dat tegenkoppeling een hoogimpedant punt in de schakeling introduceert en dat in zo'n hoogimpedant punt faseverschuivingen ontstaan. Tot 20 kHz kan men dit met fasecompensatie wel in de hand houden, maar boven deze frequentie lopen de fasekarakteristieken snel uit de hand.

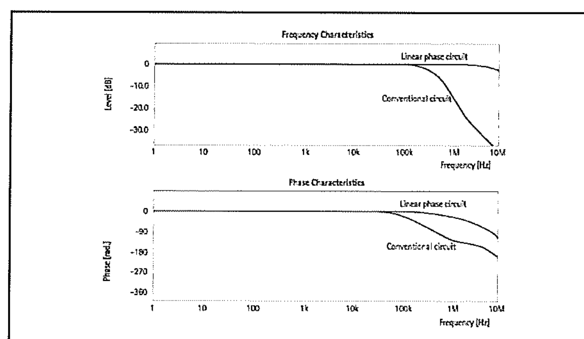
Om dit faseprobleem op te lossen heeft men een nieuwe technologie voor tegenkoppeling ontwikkeld: lineaire fase compensatie. Het blokschema van dit systeem is voorgesteld in figuur 5/7.8-17.



Figuur 5/7.8-17: Het principe van lineaire fase compensatie.

Het ingangssignaal doorloopt eerst een 0 dB buffer en gaat vervolgens naar de stroomsensor weerstand R_S. De uitgangsspanning van de versterker wordt via de tegenkoppelweerstand R_f ook aan deze weerstand aangeboden. Door deze weerstand lopen dus twee stromen. Uit de wet van Kirchoff volgt dat er in ieder knooppunt stroomevenwicht moet heersen. Kortom, de verschilstroom vloeit via de feedback-lijn af naar een stroom naar spanning omzetter I/V. De uitgangsspanning van deze schakeling stuurt de spanningsversterking van de uitgangsbuffer.

Op deze manier wordt er dus wél aan tegenkoppeling gedaan en zal de versterker zichzelf in een bepaald instelpunt stabiliseren, zoals bij de traditionele tegenkoppeling gebeurt. Maar het grote verschil is dat er nu geen sprake is van **spanningstegenkoppeling** van de in- naar de uitgang. Bovendien werkt de **stroomtegenkoppeling** per definitie met een laag-impedante weerstand R_S. Hierdoor is de kans dat er faseverschuivingen ontstaan minimaal. Dat dit niet overdreven is blijkt wel uit de frequentie- en fase-karakteristieken die in figuur 5/7.8-18 zijn voorgesteld. Tot 100 kHz is er geen sprake van merkbare verzwakking of faseverschuivingen tussen in- en uitgang.

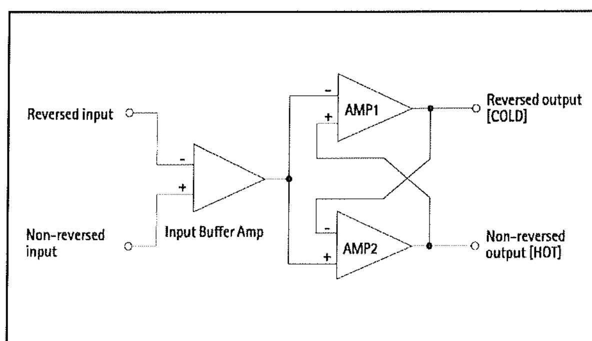


Figuur 5/7.8-18: De frequentie- en fase-karakteristieken van de versterkers.

Het principe van lineaire fase compensatie wordt zowel in de voor- als in de eindversterker toegepast.

Gebalanceerde signaalverwerking

De meeste audio-systemen werken met asymmetrische of ongebalanceerde signalen. U weet wel, signaaloverdracht via een afgeschermde kabel. Asymmetrische systemen zijn echter, ondanks de afscherming, gevoelig voor allerlei stoorsignalen. U heeft ongetwijfeld al meegemaakt dat er een luide klik uit uw luidsprekers opstijgt als de koelkast in de keuken aanslaat. Het Sony-systeem werkt met symmetrische of gebalanceerde signaaloverdracht van de SCD-1 naar de TA-E1 en van de TA-1 naar de TA-N1. Op deze manier wordt absoluut voorkomen dat stoorsignalen in de audioinstallatie kunnen doordringen.
Het basisprincipe van een symmetrische trap is voorgesteld in figuur 5/7.8-19.

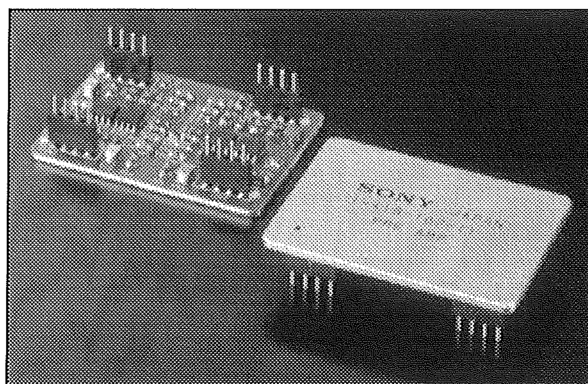


Figuur 5/7.8-19: Het principe van symmetrische versterking.

Het audio-signaal wordt omgezet in twee signalen die ten opzichte van elkaar geïnverteerd zijn. Beide aders zitten in een gemeenschappelijke afscherming. De basisversterker lijkt erg veel op een professionele instrumentatieversterker. Het zal duidelijk zijn dat de common mode rejection, zoals dat officieel heet, nu maximaal is.
Alle trappen in de voorversterker zijn gebalanceerd uitgevoerd, evenals de voorversterker in de eindversterker.

Afgeschermde modules

Een volgende belangrijke stap naar compromisloze versterking is het onderbrengen van alle trappen in volledig afgeschermde modules. Zoals uit figuur 5/7.8-20 blijkt, worden de basisversterkers van figuur 5/7.8-19 uitgevoerd met SMD-onderdelen, gemonteerd op een printje dat op een aluminium basis is geplakt. De gehele schakeling wordt luchtdicht afgesloten met een aluminium behuizing. Op deze manier is iedere trap nog eens extra afgeschermd tegen beïnvloeding door externe stoorsignalen. Bovendien garandeert de aluminium behuizing en de aluminium bodemplaat een maximale warmte-overdracht en een vrijwel constante temperatuur voor alle onderdelen.

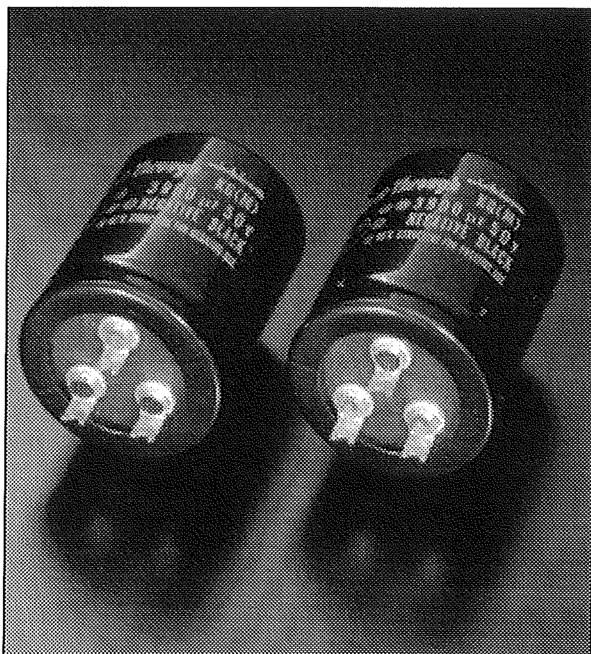


Figuur 5/7.8-20: De basisversterkers van figuur 5/7.8-19 worden op deze manier ondergebracht in volledig afgeschermde modules.

Smooth Flowing Electrolytic Capacitors

Ook aan de voedingen van beide versterkers heeft Sony de nodige aandacht besteed en nieuwe paden gebaand. Iedere voeding is uiteraard voorzien van afvlakcondensatoren. Nu is het met afvlakcondensatoren zo gesteld dat deze gedurende iedere halve periode van de netspan-

ning maar even worden opgeladen en nadien de lading weer langzaam prijs geven aan de aangesloten schakelingen. Er vloeit dus even een heel grote laadstroom in de condensator en nadien een vele kleinere ontlaadstroom uit de condensator. Normale afvlakcondensatoren worden zo gemaakt dat zij die grote piekladstroom kunnen verwerken. Dat die constructie bepaalde nadelen heeft als de condensator nadien een veel kleinere ontlaadstroom moet leveren is dan jammer. Wat is het verschil?

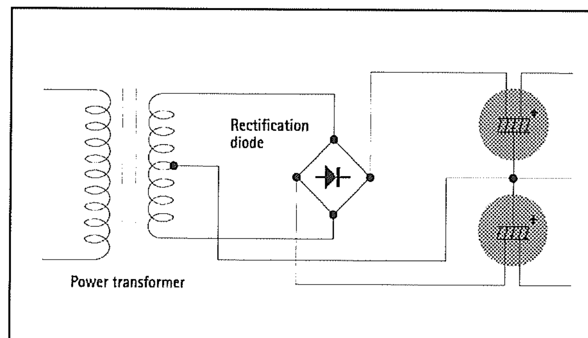


Figuur 5/7.8-21: De nieuwe generatie afvlakcondensatoren van Sony.

Om een ingewikkeld verhaal simpel te maken: voor het verwerken van de grote laadstroom heeft de elco minimale inductantie nodig, voor het leveren van de kleine ontlaadstroom komt enige inductantie goed van pas. Die inductantie werkt namelijk mee aan het onderdrukken van de hoge harmonischen van de 50 Hz en 100 Hz netspanningscomponenten. Vergelijk het maar met de smoorspoelen die vroeger in de voedingen van buizenversterkers werden toegepast.

Speciaal voor de versterkers van dit SACD-systeem heeft Sony nieuwe condensatoren ontworpen met **drie** aansluitpennen, zie figuur 5/7.8-21. Deze condensatoren heten “Smooth Flowing Electrolytic Capacitors”.

Eén aansluiting vormt uiteraard de negatieve pool. De positieve pool is gesplitst in een positieve pool voor lading en een positieve pool voor ontlading. De constructie is nu zowel geoptimaliseerd voor het snel ontvangen van de smalle grote laadstroompiek als voor het langere tijd leveren van de kleinere ontlaadstroom. Het overbekende schema van een afgevlakte voeding komt er nu dus opeens iets anders uit te zien, zie figuur 5/7.8-22.



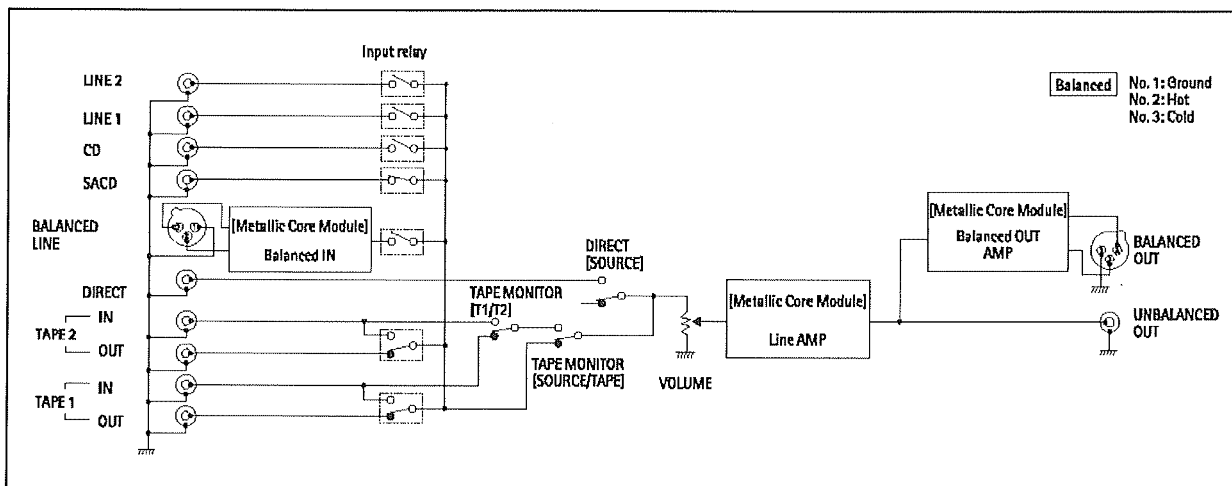
Figuur 5/7.8-22: Het schema van een afgevlakte voeding met de nieuwe generatie afvlakelco's van Sony.

De TA-E1 voorversterker

Specificaties

De TA-E1 voorversterker, zie figuur 5/7.8-23, heeft de onderstaande specificaties:

7.8 Super Audio CD weergave-apparatuur

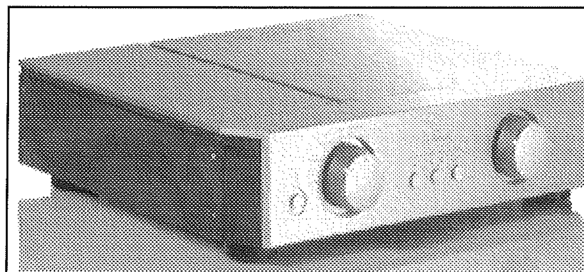


Figuur 5/7.8-24: Het blokschema van de TA-E1 voorversterker.

- versterking:
  18 dB max.
- ingangsgevoeligheid:
  250 $mV_{effectief}$
- ingangsimpedantie:
  20 kΩ ongebalanceerd
  40 kΩ gebalanceerd
- uitgangsspanning:
  2,0 $V_{effectief}$ typisch
- uitgangsimpedantie:
  47 Ω ongebalanceerd
  220 Ω gebalanceerd
- frequentiebereik:
  5 Hz tot 200 kHz, +/-1 dB
- signaal/ruis-verhouding:
  115 dB typisch
- totale harmonische vervorming:
  0,005 % (20 Hz tot 20 kHz)
- afmetingen:
  43 x 10,8 x 44,5 cm^3
- gewicht:
  21,5 kg (sic!)

Het blokschema

Het blokschema van de TA-E1 is voorgesteld in figuur 5/7.8-24. Het apparaat heeft acht ingangen:
- LINE 1;
- LINE 2;
- CD;
- SACD;
- Balanced IN;
- Direct IN;
- TAPE 1;
- TAPE 2.



Figuur 5/7.8-23: De voorversterker TA-E1.

De ingangen worden niet met druk- of draaischakelaars geschakeld en al helemaal niet met het een of ander IC, maar met speciale relais met gouden contacten. Opmerkelijk is de afwezigheid van een toonregeling of een balansinstelling. De twee enige instellingen zijn twee grote volumeregelaars, waarmee men het volume van beide kanalen individueel kan instellen en op deze manier toch de balans kan regelen, zij het een beetje omslachtig.

Waarom er geen toonregeling aanwezig is? Omdat volgens Sony toonregelingen verzamelaars van faseverschuivingen en harmonische vervormingen zijn en men daar bij dit "super high end"-ontwerp niets mee te maken wil hebben. Bovendien vindt Sony de kwaliteit van SACD zo goed en de specificaties van de speciaal ontworpen luidsprekers zo uitstekend dat er niet aan de correcte frequentieweergave gesleuteld moet worden.

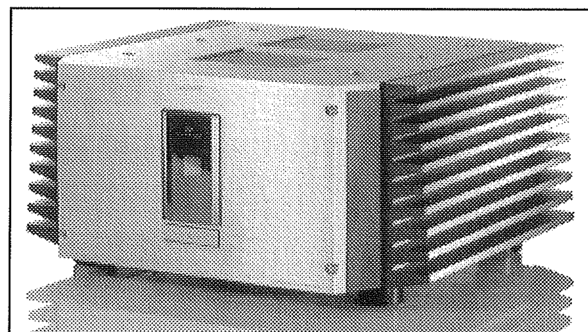
De eindversterker TA-N1

Specificaties

Ook de eindversterker, zie figuur 5/7.8-25, mag er wezen. Met zijn gewicht van niet minder dan 70 kg (!) bestaat er weinig kans dat het apparaat als gevolg van de trillingen van de luidsprekerboxen van de kast valt. Dat gewicht zit hem in een speciaal ontworpen reusachtige voedingstrafo, immens grote koelprofielen, vier knotsen van afvlakelco's en een stabiel gegoten aluminium chassis.

De specificaties van deze droomversterker:

- versterking:
  28 dB typisch
- uitgangsvermogen:
  2 x 200 $W_{effectief}$ in 8 Ω
  2 x 400 $W_{effectief}$ in 4 Ω
- luidsprekerimpedantie:
  4 Ω min., 16 Ω max.
- totale harmonische vervorming:
  0,005 % typisch
- dempingsfactor:
  meer dan 150
- signaal/ruis-verhouding:
  115 dB typisch
- frequentiebereik:
  5 Hz tot 300 kHz (-1 dB)
- ingangsimpedantie:
  20 kΩ ongebalanceerd
  40 kΩ gebalanceerd
- afmetingen:
  48 x 24,5 x 53 cm[34]
- gewicht:
  70 kg



Figuur 5/7.8-25: De 70 kg zware eindversterker TA-N1.

Blokschema

Uiteraard is ook bij deze eindversterker alles dat een absoluut getrouwe audioweergave in de weg staat geëlimineerd. Het blokschema, zie figuur 5/7.8-26, is dan ook recht-toe-recht-aan. Via relais worden de drie ingangen:

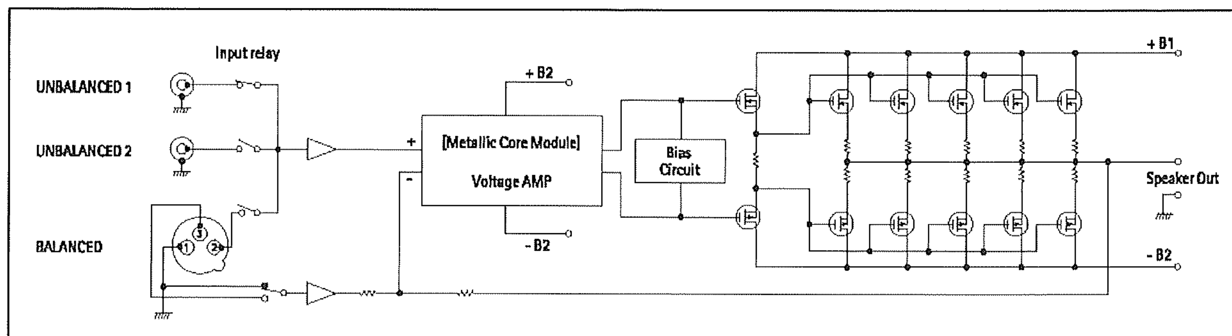
- ongebalanceerd 1;
- ongebalanceerd 2;
- gebalanceerd;

met de spanningsversterker verbonden. Nadien volgt het bias-circuit, dat de eindtrappen in klasse A/B instelt. De complementaire eindtrap is opgebouwd uit 2 x 5 zorgvuldig gepaarde MOSFET's.

TTCT-voedingstrafo

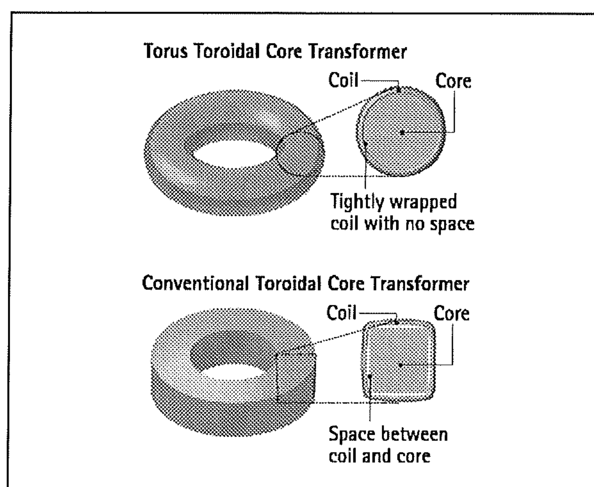
Wij schreven al dat de voedingstrafo voor een belangrijk deel bijdraagt aan de gewichtigheid van deze versterker. Iedere in audio geïnteresseerde lezer vermoedt natuurlijk dat er in zo'n versterker ongetwijfeld een ringkern-trafo wordt toegepast.

7.8 Super Audio CD weergave-apparatuur



Figuur 5/7.8-26: Blokschema van de eindversterker.

Dat is ook zo, maar ook hier vond Sony het bestaande niet goed genoeg. Speciaal voor de TA-N1 werd een speciale trafo ontwikkeld, zie figuur 5/7.8-27, waarbij de kern absoluut cirkelvormig is. Natuurlijk vonden de schriftgeleerden van Sony een passende kreet: "Torus Toroidal Core Transformer". Normale ringkern-trafo's (zie onder) hebben een kern die tamelijk vierkantig is. Als men over zo'n kern gaat wikkelen, ontstaat er per definitie een kleine luchtspleet tussen de kern en de windingen.



Figuur 5/7.8-27: De speciale "Torus Toroidal Core Transformer" van Sony.

Maar hadden we nu niet ringkern-trafo's ontwikkeld om verlost te zijn van die vervelende luchtspleten met hun hoge magnetische weerstanden? Dus gingen de ontwerpers van Sony aan de slag en kwamen met de voor de hand liggende oplossing van de absoluut cirkelvormige kern. De wikkeldraad sluit nu mooi aan op deze kern en de luchtspleet wordt dus geminimaliseerd. Het gevolg is uiteraard een minimale magnetische weerstand tussen de wikkelingen en een mooie stabiele voedingsspanning, zelfs bij piekbelastingen.

De luidsprekers SS-M9ED

Specificaties

Wie de gewichten van de versterkers tot zich heeft laten doordringen zal wel niet verbaasd wezen dat de luidsprekers van het Sony-systeem in het olifantenverblijf van Artis niet zouden misstaan. Iedere luidsprekerbox weegt 59,5 kg. Maar daarvoor krijgt u wél een systeem met vijf luidsprekers per box dat 400 W_{peak} kan behappen. Wie de constructie van de box bewondert, zie figuur 5/7.8-28, zal het gewicht misschien niet meer zo vreemd vinden.

De specificaties van de box samengevat:

- type:
  4-weg basreflex met 5 luidsprekers
- configuratie:
  2 x 203 mm woofers

7.8 Super Audio CD weergave-apparatuur

1 x 127 mm midrange
1 x 25,4 mm tweeter
1 x 25,4 mm super-tweeter

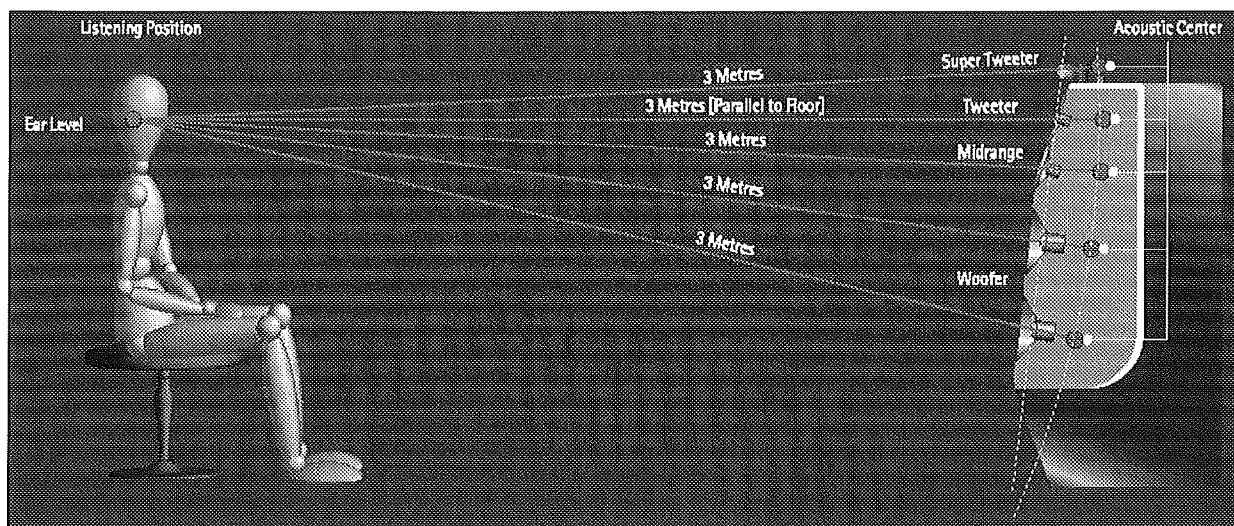


Figuur 5/7.8-28: De box SS-M9ED half opengezaagd.

- frequentiebereik:
  20 Hz tot 100 kHz binnen 3 dB
- nominale impedantie:
  4 Ω
- gevoeligheid:
  86 dB op 1 m bij 2,83 V
- maximaal vermogen:
  400 W_{peak}
- cross-over frequenties:
  200 Hz, 2 kHz, 22 kHz
- afmetingen:
  112,5 x 40 x 55,5 cm^3
- gewicht:
  59,5 kg

De filosofie achter het ontwerp
De ontwerpers van de luidsprekerbox gingen er van uit dat het audiobereik van de SACD tot 100 kHz ook door de luidsprekers moet worden weergegeven. Dat is met normale luidsprekers niet mogelijk. Vandaar dat er een speciale “super-tweeter” werd ontwikkeld, die niet in de box zat, maar boven op de box werd gemonteerd. De ontwerpvoorwaarden voor deze nieuwe luidspreker waren een weergavebereik tot 150 kHz en de capaciteit om zeer hoge vermogens vervormingsloos te verwerken.
Omdat bij het totale ontwerp van het systeem maximale aandacht werd besteed aan het reduceren van fasevervormingen werd aan dit aspect ook bij het ontwerp van de luidsprekerbox veel energie besteed. In een box die diverse luidsprekers bevat is het van het allergrootste belang de looptijdverschillen te minimaliseren. Dit wordt toegelicht aan de hand van figuur 5/7.8-29. Bij de opname van een muziekstuk komen alle signalen van alle geluidsbronnen vrijwel zonder onderlinge vertragingen in diverse microfoons terecht. Ieder muzikant beschikt immers over een eigen microfoon. Om dit klankbeeld zo natuurgetrouw te reproduceren moeten de geluidsgolven, geproduceerd door de diverse luidsprekers, de toehoorder ook gelijktijdig bereiken. Vandaar dat de voorkant van de box een zeer specifieke vorm heeft. Dank zij deze specifieke vorm komen de loodlijnen, getrokken uit de conussen van alle luidsprekers, op precies 3 m in één snijpunt bij elkaar en wel op een hoogte van de grond die overeen komt met de oorpositie van de mens.

7.8 Super Audio CD weergave-apparatuur



Figuur 5/7.8-29: De filosofie bij het ontwerpen van de vormgeving van de kast heeft alles te maken met een optimale luisterafstand van drie meter.

Die drie meter wordt dan ook als ideale luisterafstand aanbevolen.

Anti-vibratie maatregelen

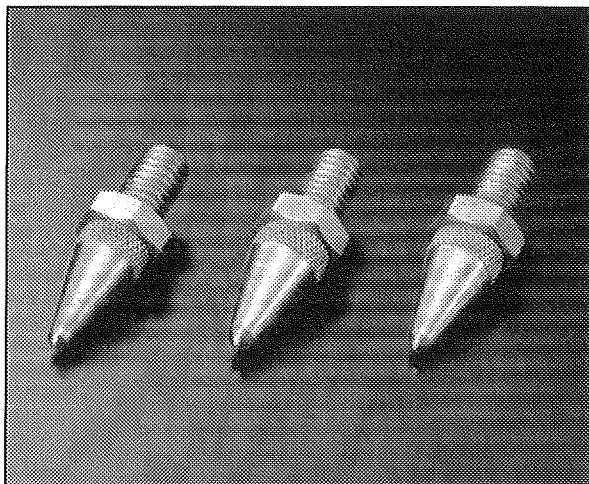
Bij luidsprekerboxen die dergelijke grote vermogens kunnen weergeven komt het er op aan paracitaire resonanties zoveel mogelijk te voorkomen. De constructie van de box is er helemaal op gericht om vibraties, resonanties en staande golven in de behuizing te onderdrukken. Zo zijn bijvoorbeeld alle scherpe hoeken afgerond met wiskundig berekende cirkelsegmenten. Op deze manier worden vibraties die in de wandpanelen kunnen ontstaan zoveel mogelijk gedempt. De ronde hoeken beletten immers dat vibraties in de wandplaten heen en weer worden gekaatst. Bovendien zijn er maar weinig rechte hoeken te ontdekken. Ook dit heeft alles te maken met het onderdrukken van mechanische resonanties in de behuizing.

Natuurlijk zijn alle denkbare maatregelen genomen om staande golven in de behuizing te onderdrukken. Er zijn geen evenwijdig gemonteerde platen in de behuizing te ontdekken. Op deze manier worden golven niet op één as heen en weer gekaatst, maar onder bepaalde hoeken waardoor het ontstaan van staande golven is uitgesloten. De frontplaat, waarop de luidsprekerchassis zijn bevestigd, bestaat uit een sandwich-constructie van twee platen dik MDF waartussen een dempende laag is aangebracht.

Maar zelfs aan de pootjes die onder de luidsprekerbox zijn gemonteerd is speciale aandacht besteed. Zoals uit figuur 5/7.8-30 blijkt, rust de box op slechts drie scherp gepinde pootjes, die uiteraard in hoogte verstelbaar zijn. Er is voor drie en niet voor vier pootjes gekozen, omdat drie steunpunten zelfs op een ongelijke vloer altijd een stabiele wankelvrije opstelling garanderen.

De drie scherpe pennen zorgen ervoor dat de onvermijdelijke mechanische trillingen van de luidsprekerkast bij het weergeven van hoge volumes niet aan de vloer worden doorgegeven. Wat de gemiddelde vloer echter van een dergelijke zware naaldvormige belasting vindt, vertelt het Sony-verhaal niet!

7.8 Super Audio CD weergave-apparatuur

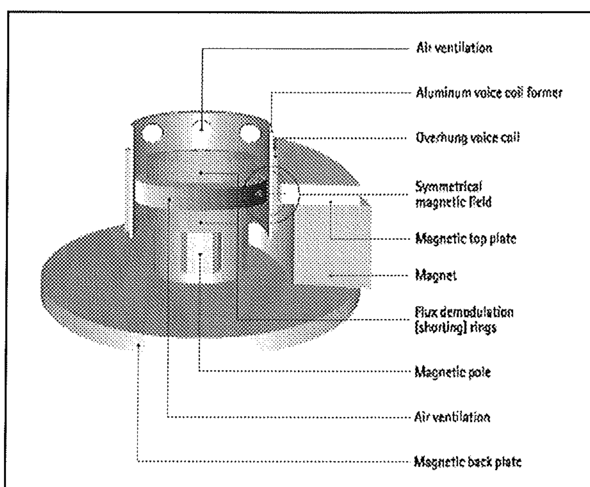


Figuur 5/7.8-30: De loodzware boxen rusten op slechts drie scherpgepunte pootjes. Op deze manier wordt een wankelvrije en stabiele opstelling gegarandeerd zonder overdracht van trillingen.

De luidsprekerchassis

Een SACD heeft een dynamisch bereik van maximaal 120 dB. Een immens hoge waarde die echter door de voor- en eindversterker probleemloos wordt verwerkt. Het was de taak van de luidsprekerontwerpers om dit dynamisch bereik ook door de luidsprekerboxen zo vervormingsvrij te laten reproduceren. Dat is gemakkelijker gezegd dan gedaan! Immers, de mechanische constructie van een standaard luidspreker bevat per definitie een groot aantal bronnen van vervorming. Die vervormingen treden al op bij veel kleinere signalen dan deze die met 120 dB overeen komen. Voor de SS-M9ED boxen werden dus volledig nieuwe luidsprekerchassis ontwikkeld.
De conussen van de speakers werden gemaakt van polypropyleen, een materiaal dat zowel licht als zeer sterk is. Ook voor de ophangingen van de conussen aan de chassis werden speciale materialen ontwikkeld, die een grote soepelheid koppelen aan extreem grote mechanische stabiliteit.
Wil een luidsprekerchassis dergelijke grote dynamische bereiken weergeven, dan worden hoge eisen gesteld aan de spreekspoel. Deze moet veel breder zijn dan de luchtspleet waarin het magnetisch veld heerst. Een brede spoel heeft echter veel windingen en die windingen hebben een vrij hoge weerstand. Een hoge weerstand heeft tot gevolg dat er minder vermogen wordt gegenereerd. Om dit probleem op te lossen werd een speciale aluminiumlegering ontwikkeld, waaruit de wikkeldraad voor de spreekspoelen werd getrokken en die een dusdanige soortelijke weerstand heeft dat de brede spoel toch een impedantie van 4 Ω heeft.
Een tweede factor die vervormingen introduceert is de opwarming van de spreekspoel als gevolg van het grote vermogen dat wordt gedissipeerd. Door die opwarming neemt de impedantie toe of af, waardoor het evenwicht in het berekende scheidingsfilter wordt verstoord. De constructie waarop de spreekspoelen zijn gewikkeld is vandaar voorzien van ventilatiegaatjes, die zorgen voor een extra luchtstroom rond de spoelen. Op deze manier blijft de temperatuursverhoging van de spoelen binnen de perken.
Een derde oorzaak van vervorming is de structuur van het magnetisch veld in de luchtspleet. Dit moet in alle richtingen volledig symmetrisch zijn. Om deze volmaakte symmetrie te bereiken werden zowel op de drager van de spreekspoelen als rond de permanente magneten speciale verstelbare egalisatieringen van diverse metalen aangebracht. Op deze manier is men na de fabricage van een luid-

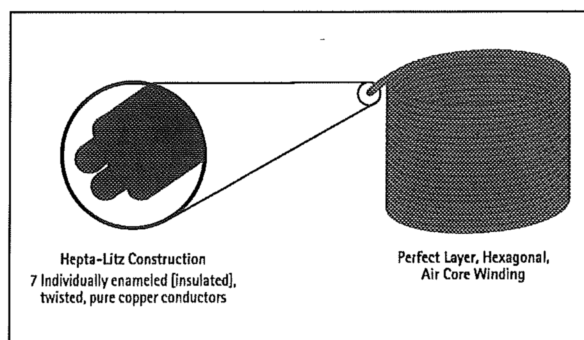
sprekerchassis is staat de symmetrie van het magnetisch veld in de luchtspleet volledig af te regelen.
Figuur 5/7.8-31 geeft een impressie van de constructie van de spreekspoel, de permanente magneet en de vermelde egalisatieringen.



Figuur 5/7.8-31: De constructie van de fundamenteelste onderdelen van een luidsprekerchassis: de spreekspoel met de permanente magneet.

De scheidingsfilters

Het scheidingsfilter speelt een belangrijke rol in de globale specificaties van een luidsprekersysteem. In de SS-M9ED wordt gebruik gemaakt van passieve filters met eens steilheid van niet minder dan 24 dB/octaaf. Speciale aandacht werd besteed aan de constructie van de spoelen. Deze worden doorlopen door grote stromen en warmen dus op. Deze opwarming heeft variaties van de specificaties van de spoelen tot gevolg. Toepassen van dikkere wikkeldraad helpt, maar is aan grenzen gebonden. Dus heeft Sony gekozen voor een alweer zeer innovatieve oplossing: de wikkeldraad is niet massief, maar volgens het Litze-principe samengesteld uit zeven van elkaar geïsoleerde dunne draden, zie figuur 5/7.8-32.



Figuur 5/7.8-32: De spoelen van de scheidingsfilters zijn gewikkeld met Litze-draad.

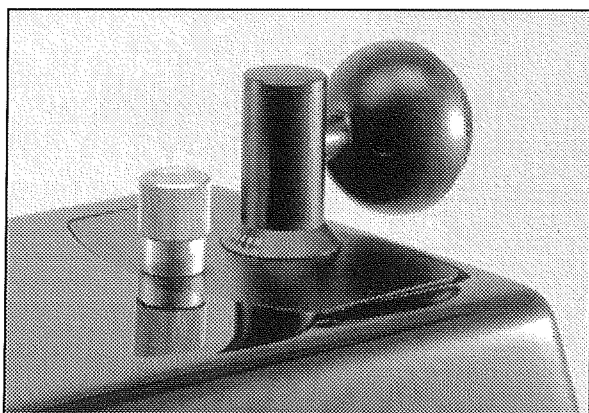
Het gevolg is dat de hoogfrequente stroom, die per definitie voornamelijk door de buitenste schil van een draad vloeit (het Skin-effect), nu een veel groter oppervlak ter beschikking heeft. De soortelijke weerstand van de wikkeldraad neemt af, zodat opwarmingsproblemen worden geminimaliseerd. Alle spoelen in de scheidingsfilters zijn hexagonaal gewikkeld rond een luchtkern. Dit heeft wel als nadeel dat veel meer wikkeldraad moet worden gebruikt om een bepaalde zelfinductie te verkrijgen, maar dit nadeel wordt ruimschoots gecompenseerd door het wikkelen met de speciaal voor deze spoelen gemaakte Litze-draad. De onderdelen van de scheidingsfilters zijn uiteraard gemonteerd op een gedrukte bedrading. Maar omdat men de soortelijke weerstand van normale epoxy-print te hoog vond, werd speciale print gemaakt met een extra dikke koperlaag.

De “Wireless Diaphragm” super-tweeter

Deze luidspreker die tot 150 kHz kan weergeven, is een waar kunststukje van

7.8 Super Audio CD weergave-apparatuur

moderne technologie. Maar laten wij eerst iets schrijven over de positie van deze tweeter. Zoals uit figuur 5/7.8-33 blijkt, zit deze speaker niet in de behuizing van de box, maar is op de bovenzijde gemonteerd. Een gril van een eigenzinnige designer? Absoluut niet! Zoals u ongetwijfeld weet, is de uitstralingshoek van een luidspreker afhankelijk van de frequentie. Hoe hoger de frequentie, hoe smaller de bundel energie die wordt uitgezonden. Bij de frequenties die deze super-tweeter moet weergeven is de openingshoek van de luidspreker zo smal dat de ontwerpers het nodig achtten de tweeter op de positie van de luisteraar af te regelen.



Figuur 5/7.8-33: De super-tweeter is op de bovenzijde van de luidsprekerbox gemonteerd en kan op de luisteraar worden gericht.

Dat was niet zo gemakkelijk te realiseren als de super-tweeter in de kast werd gemonteerd. Vandaar deze nogal eigenzinnige oplossing. Achter de super-tweeter zit een draaiknop, waarmee de uitstraling van de tweeter over een hoek van +/-15 graden precies op de luisteraar kan worden gericht.

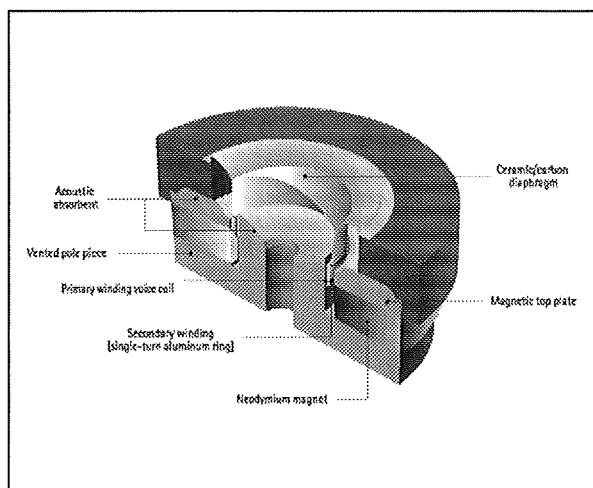
Nu terug naar de technologie. Bij het weergeven van frequenties boven 20 kHz heeft men te maken met de stugheid en het gewicht van de conus. De bij normale tweeters gebruikte materialen bleken totaal ongeschikt voor deze frequenties. Te zwaar, niet stug genoeg. Dus werd alweer een blik materiaaltechnologen opengetrokken die vaststelden dat een conus (bij tweeters ook dome genoemd) van een compositie van een ceramisch materiaal en koolstof de enig bruikbare oplossing was. Het resultaat is een zeer lichte dome die toch voldoende stugheid heeft om op deze hoge frequenties zonder vertraging en vervorming te gaan trillen.

Een tweede probleem was de constructie van de spreekspoel. Uit experimenten bleek dat de gebruikelijke constructie, waarbij de spreekspoel aan de dome is bevestigd en door middel van twee flexibele adertjes naar het chassis gaat, niet bruikbaar was. Alweer, te zwaar en niet flexibel genoeg voor dergelijke hoge frequenties. Dus werd voor een revolutionaire oplossing gekozen: een trafo! Op de dome wordt een spoel bevestigd, gewikkeld uit een wikkeldraad van een uiterst lichte aluminium legering. Deze spoel wordt kortgesloten en nergens mee verbonden. Op de permanente magneet wordt een tweede spoel bevestigd, de secundaire wikkeling genoemd, die is aangesloten op het scheidingsfilter. Tussen de dome, die op de weer te geven hoge frequenties moet trillen en het chassis bestaat dus géén elektrische verbinding met de inherente ongewenste mechanische eigenschappen zoals gewicht en stugheid van de draden. Vandaar dat deze super-tweeter "Wireless Diaphragm" wordt genoemd, zie figuur 5/7.8-34.

Hoe een en ander werkt? Simpel, het aan de super-tweeter aangeboden HF-

7.8 Super Audio CD weergave-apparatuur

signaal wekt een magnetisch veld op rond de secundaire spoel die rond de permanente magneet is gewikkeld.



Figuur 5/7.8-34: De constructie van de "Wireless Diaphragm" supertweeter.

Dit veld wekt in de kortgesloten primaire spoel op de dome een spanning op. Maar vanwege de kortsluiting zal er door deze wikkeling een grote stroom gaan vloeien. Deze stroom wekt rond de kortgesloten wikkeling een magnetisch veld op. Dit veld interfereert met het veld van de permanente magneet. Er onstaat een krachtenveld dat zorgt voor het trillen van de dome. Omdat de massa van de dome minimaal is en mechanische massavertragingen nauwelijks aanwezig zijn, zal de dome tot ongeveer 150 kHz keurig mechanisch en vrijwel vervormingsvrij gaan trillen op het ritme van het signaal.